



PUC

RIO

Dissertação de Mestrado

Deslocamento sequencial de fluidos através de regiões alargadas em dutos anulares

Matheus Pinto Xavier

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Centro Técnico Científico
Departamento de Engenharia Mecânica

Rio de Janeiro, 06 de outubro de 2025



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Deslocamento sequencial de fluidos através de regiões alargadas em dutos anulares

Matheus Pinto Xavier

Orientação: Professora Mônica Feijó Naccache

Coorientação: Doutora Priscilla Ribeiro Vargas

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, no Departamento de Engenharia Mecânica.

Rio de Janeiro, 6 de outubro de 2025



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Deslocamento sequencial de fluidos através de regiões alargadas em dutos anulares

Matheus Pinto Xavier

**Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau
de Mestre em Design. Aprovada pela Comissão examinadora abaixo:**

Professora Mônica Feijó Nacchace, D.Sc
Orientadora
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Doutora Priscilla Ribeiro Varges, D.Sc
Coorientadora
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Doutor André Leibsohn Martins, D.Sc
Petróleo Brasileiro – Rio de Janeiro - Matriz

Doutor Rodrigo Lipparelli Fernandez, D.Sc
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Rio de Janeiro, 6 de outubro de 2025



Pontifícia
Universidade
Católica do
Rio de Janeiro

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Matheus Pinto Xavier

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela PUC-Rio em 2020.

Ficha Catalográfica

Xavier, Matheus Pinto

Deslocamento sequencial de fluidos através de regiões alargadas em dutos anulares / Matheus Pinto Xavier; orientadora: Mônica Feijó Naccache; co-orientador: Priscilla Ribeiro Varges,. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2025.

v., 107 f: il. color. ; 30 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

2.

Inclui bibliografia

3. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Deslocamento de fluido;. 3. Dutos anulares;.

4. Zona erodida;. 5. Reologia.. I. Naccache, Mônica. II. Varges, Priscilla. III.

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV.

CDD: 004

Aos meus pais, irmãos e família
pelo apoio e encorajamento.

Agradecimentos

Gostaria de expressar meu reconhecimento à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), instituição onde tive a oportunidade de construir minha formação acadêmica, minhas vivências e minha jornada profissional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Aos meus familiares, pelo amor, apoio constante, assistência e incentivo em todos os momentos da minha vida. Vocês são minha base, minha força e meu alicerce para seguir em frente, mesmo diante dos desafios mais difíceis.

Às minhas orientadoras, Prof^a Mônica Feijó Naccache e Prof^a Priscilla Ribeiro Varges, cuja dedicação, conhecimento e generosidade foram fundamentais para a realização deste trabalho. Sou imensamente grato pelas críticas construtivas, paciência e pela inspiração que transformaram este processo em uma experiência profunda e enriquecedora.

À minha parceira de projeto, Vanessa Martins Picoli, meu sincero agradecimento. Sua colaboração foi essencial; foi ao seu lado que desenvolvi com mais maturidade minhas habilidades como pesquisador. Obrigado por ser meu braço direito e por contribuir para a construção de uma equipe maravilhosa.

Aos colegas de trabalho, amigos de classe e alunos de iniciação científica, agradeço pela amizade, pela troca e por me ajudarem a manter o ânimo e a motivação ao longo da jornada.

Aos meus pais, pela educação, carinho e atenção presentes em todos os momentos. À casa de Caboclo Boiadeiro, minha eterna gratidão por me sustentar espiritualmente e manter meus caminhos alinhados com meus ancestrais.

Aos colegas e amigos da PUC-Rio, com quem compartilhei aprendizados, desafios e conquistas, meu sincero agradecimento.

Aos professores membros da banca examinadora, agradeço pela leitura atenta, pelas valiosas contribuições e pelo olhar cuidadoso sobre este trabalho.

Resumo

Xavier, Matheus; Naccache, Mônica; Varges, Priscilla. **Deslocamento sequencial de fluidos através de regiões alargadas em dutos anulares.** Rio de Janeiro, 2025. 107p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Para garantir o sucesso da operação de cimentação em poços de petróleo, é essencial que a pasta de cimento efetivamente desloque o fluido de perfuração do espaço anular entre o poço e o revestimento. Este processo é altamente complexo devido ao comportamento não newtoniano dos fluidos, adicionalmente complicado pela presença de regiões erodidas. A eficiência de deslocamento depende de vários parâmetros, incluindo as propriedades reológicas e densidades dos fluidos, vazão e parâmetros geométricos. Este estudo apresenta uma investigação experimental abrangente do processo de deslocamento em poços de petróleo com zonas erodidas, acompanhada por uma análise de sua eficiência de deslocamento. O conjunto de fluidos compreende três fluidos newtonianos ou não newtonianos representativos daqueles encontrados em processos de cimentação reais. Diferentes conjuntos de fluidos, vazões, inclinação e excentricidades foram investigados. Caracterizações reológicas dos fluidos foram conduzidas usando um reômetro rotacional, e as densidades foram medidas com um densímetro digital. A seção de teste de acrílico consiste em uma geometria anular com uma expansão-contração adrupta, apresentando dimensões fixas e excentricidade variando de 0 a 100%. Uma bomba de parafuso único foi utilizada para impor uma taxa de injeção constante por meio de garrafas de transferência. Um medidor de vazão Coriolis foi instalado na saída da seção de teste para medir a taxa de vazão, o volume bombeado e a densidade dos fluidos que saem da seção de teste. Os resultados sugerem que a faixa de vazão e excentricidades exploradas não afeta significativamente a eficiência do deslocamento. Além disso, é mostrado que a razão entre viscosidade e densidade desempenha um papel importante no deslocamento os fluidos. Mais investigações são necessárias para compreender as interações entre os parâmetros em estudo.

Palavras-chave

Deslocamento de fluido; Dutos anulares; Zona erodida; Reologia.

Abstract

Xavier, Matheus; Naccache, Mônica (Advisor); Varges, Priscilla (Co-Advisor). **Sequential displacement of fluids through enlarged regions of annular ducts.** Rio de Janeiro, 2025. 107p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

To ensure the success of the cementing operation in oil wells, it is essential that the cement slurry effectively displaces the drilling fluid from the annular space between the well and the casing. This process is highly complex due to the fluids non-Newtonian behavior, additionally complicated by the presence of eroded regions. The displacement efficiency depends on several parameters, including the fluids rheological properties and densities, flow rate, and geometrical parameters. This study presents a comprehensive experimental investigation of the displacement process in oil wells with eroded zones accompanied by an analysis of its displacement efficiency. The fluid ensemble comprises three Newtonian or non-Newtonian fluids representative of those encountered in actual cementation processes. Different sets of fluids, flow rates, inclination, and eccentricities were investigated. Rheological characterizations of the fluids were conducted using a rotational rheometer, and the densities were measured with a digital densimeter. The Plexiglass test section consists of an annular geometry whose external wall possessed a sudden expansion-contraction, featuring fixed dimensions and variable eccentricity ranging from 0 to 100%. A single screw pump was utilized to impose a constant flow rate via transfer bottles. A Coriolis flowmeter was installed at the test section outlet to measure the flow rate, pumped volume, and density of the fluids leaving the test section. The results suggest that the range of explored flow rates and eccentricities do not significantly affect displacement efficiency. Moreover, it is shown that the viscosity and density ratio play a major role on the flow displacement. Further investigation is required to comprehend the interactions among the parameters under study.

Keywords

Fluid displacement; Annular duct; Eroded region; Drilling fluid; Rheology.

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Objetivos	17
2	Revisão Bibliográfica	18
3	Metodologia	24
3.1	Procedimento Experimental	24
3.2	Bancada experimental	26
3.3	Fluidos utilizados	33
3.4	Caracterização dos fluidos	34
3.5	Matriz de teste experimental	44
4	Resultados	46
4.1	Caracterização de fluidos	46
4.2	Resultados Experimentais de Deslocamento	58
5	Conclusão	99
6	Referências bibliográficas	101

Lista de figuras

Figura 1.1	Processo de cimentação.	17
Figura 3.1	Fluxograma do processo experimental.	25
Figura 3.2	Bancada experimental.	26
Figura 3.3	Simplificação da geometria.	27
Figura 3.4	Seção de teste em 3D.	28
Figura 3.5	Desenho esquemático.	28
Figura 3.6	Hurb de válvulas.	30
Figura 3.7	Jogo de válvulas.	30
Figura 3.8	Válvula tipo registro.	31
Figura 3.9	Válvula de esfera em "L".	31
Figura 3.10	Medidor de vazão e densidade baseado no princípio do efeito Coriolis.	32
Figura 3.11	Corte da seção transversal da bomba.	33
Figura 3.12	Anton Paar DMA 4500 M.	35
Figura 3.13	Viscosímetro <i>Ubbelohde</i> e o banho termostático.	35
Figura 3.14	Viscosímetro Fann 35A.	36
Figura 3.15	Rotor e o <i>Bob</i> do viscosímetro.	36
Figura 3.16	Reômetro rotacional.	38
Figura 3.17	Geometria Couette ranhurado.	38
Figura 3.18	Teste estabilização – fluido 16 ppg.	39
Figura 3.19	Fluidos de perfuração a) 16 ppg, b) 12 ppg e c) 10 ppg.	40
Figura 4.1	Curva de escoamento segundo viscosímetro Fann 35A	47
Figura 4.2	Teste a taxa de cisalhamento constante.	48
Figura 4.3	Curva de escoamento (tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento) dos três fluidos de perfuração.	49
Figura 4.4	Curva de escoamento (viscosidade em função da taxa de cisalhamento) dos três fluidos de perfuração.	50
Figura 4.5	Teste de varredura da amplitude de tensão a 1Hz para os três fluidos de perfuração.	51
Figura 4.6	Teste oscilatório de varredura de tempo impondo $\tau_a = 0,01$ Pa e $f = 1$ Hz.	52
Figura 4.7	Curvas de escoamento: tensão como função da taxa de cisalhamento.	53
Figura 4.8	Curvas de escoamento: viscosidade em função da taxa de cisalhamento.	53
Figura 4.9	Teste da proveta do fluido com 10 ppg.	54
Figura 4.10	Teste da proveta do fluido com 12 ppg.	54
Figura 4.11	Teste da proveta do fluido com 16 ppg.	55
Figura 4.12	Gráfico da variação do retroespalhamento de luz, em função da altura do frasco da amostra, ao longo do tempo.	56
Figura 4.13	Frasco contendo fluido de perfuração com 12 ppg após 7 dias de teste.	57

Figura 4.14 Gráfico da variação de transmissão de luz, em função da altura do frasco da amostra, ao longo do tempo.	57
Figura 4.15 Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$.	59
Figura 4.16 Bolhas de óleo na interface da água com a glicerina.	60
Figura 4.17 Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.	61
Figura 4.18 Formato da interface água-óleo do teste com excentricidade 25% a $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.	62
Figura 4.19 Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	63
Figura 4.20 Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso concêntrico (<i>standoff</i> = 100%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.	64
Figura 4.21 Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (<i>standoff</i> = 50%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.	65
Figura 4.22 Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (<i>standoff</i> = 25%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.	66
Figura 4.23 Evolução da densidade em função do volume bombeado adimensional com a bancada inclinada a 30° considerando $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO; para $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO.	67
Figura 4.24 Evolução da densidade em função do volume bombeado adimensional com a bancada inclinada a 60° considerando $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO; para $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO.	70
Figura 4.25 Interface do deslocamento do óleo pela água, na inclinação de 60° e vazão intermediária de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$, com excentricidade de a) 25% e de b) 50%.	71
Figura 4.26 Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$.	74
Figura 4.27 Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.	75
Figura 4.28 Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	76
Figura 4.29 Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso concêntrico (<i>standoff</i> = 100%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$, $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	78

Figura 4.30 Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (standoff = 50%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$, $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	79
Figura 4.31 Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (standoff = 25%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$, $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	80
Figura 4.32 Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 50% e 100% de STO, para a vazão média de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$.	82
Figura 4.33 Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 50% e 100% de STO, para a vazão média de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	83
Figura 4.34 Visualização do escoamento em 50% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0,10%, o azul o de 0,15% e o transparente o de 0,20% na vazão de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$.	84
Figura 4.35 Visualização do escoamento em 50% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0,10%, o azul o de 0,15% e o transparente o de 0,20% na vazão de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	84
Figura 4.36 Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso concêntrico (standoff = 100%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	86
Figura 4.37 Visualização do escoamento em 100% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0,10%, o azul o de 0,15% e o transparente o de 0,20% na vazão de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$.	87
Figura 4.38 Visualização do escoamento em 100% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0,10%, o azul o de 0,15% e o transparente o de 0,20% na vazão de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	88
Figura 4.39 Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (standoff = 50%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	89
Figura 4.40 Visualização do escoamento em 50% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0,10%, o azul o de 0,15% e o transparente o de 0,20% na vazão de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$.	89
Figura 4.41 Visualização do escoamento em 50% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0,10%, o azul o de 0,15% e o transparente o de 0,20% na vazão de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	90
Figura 4.42 Resíduo na cavidade STO= 50%: (a) baixa vazão e (b) alto vazão.	90
Figura 4.43 Evolução da densidade em função do volume adimensional bombeado, com a bancada inclinada a 60° , considerando a vazão de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e comparando as excentricidades de 100% e 50% de STO.	93
Figura 4.44 Visualização do escoamento em 50% STO e em baixa vazão uma inclinação de 60° .	93
Figura 4.45 Visualização do escoamento em 100% STO e em baixa vazão uma inclinação de 60° .	94
Figura 4.46 Evolução da densidade em função do volume adimensional bombeado, com a bancada inclinada a 60° , considerando a vazão de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$ e comparando as excentricidades de 100% e 50% de STO.	94

Figura 4.47 Visualização do escoamento em 50% STO na maior vazão em uma inclinação de 60°.	95
Figura 4.48 Visualização do escoamento em 100% STO na maior vazão em uma inclinação de 60°.	96
Figura 4.49 Evolução da densidade em função do volume adimensional bombeado, com a bancada inclinada a 60° e considerando STO de 100% e comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.	96
Figura 4.50 Evolução da densidade em função do volume adimensional bombeado, com a bancada inclinada a 60°, considerando STO de 50% e comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$	97

Lista de tabelas

Tabela 4.1	Densidades dos fluidos newtonianos	46
Tabela 4.2	Densidades dos fluidos não newtonianos	46
Tabela 4.3	Viscosidades dos fluidos newtonianos	47
Tabela 4.4	Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.	62
Tabela 4.5	Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.	66
Tabela 4.6	Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 30°.	69
Tabela 4.7	Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 30°.	69
Tabela 4.8	Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 60°.	72
Tabela 4.9	Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 60°.	72
Tabela 4.10	Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.	76
Tabela 4.11	Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.	80
Tabela 4.12	Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.	85
Tabela 4.13	Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical	91
Tabela 4.14	Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 60°.	97
Tabela 4.15	Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 60°.	98

*Na floresta do desconhecido, Oxóssi ilumina
a trilha. Cada folha, um ensinamento; cada
passo, uma oferenda à sabedoria ancestral.*

*Na mata fechada, onde as dificuldades se
entrelaçam como raízes, seu arco aponta para
o horizonte do conhecimento, e a flecha
atravessa a névoa da dúvida. Que os passos
desta pesquisa, como folhas caídas aos pés
dos mais velhos, nutram a terra fértil onde a
ciência e a fé se encontram. Oxóssi, caçador
de uma só flecha, que meu trabalho honre a
ancestralidade que respira nas matas e que
cada linha escrita seja uma flecha certeira
sob a bênção dos orixás. Okê arô, Oxóssi!*

Matheus Pinto Xavier, .

1

Introdução

Na indústria petrolífera, as operações de perfuração, cimentação e completação de poços são caracterizadas pelo escoamento, substituição e deslocamento de fluidos, tais como pastas de cimento, fluidos de perfuração, suspensões e emulsões. Tais fluidos em geral são não newtonianos, podendo apresentar um comportamento viscoplástico, caracterizado pela presença de uma tensão limite de escoamento, abaixo da qual o material apresenta elevada viscosidade aparente e não escoa, apresentando resposta elástica. Acima desse limiar, observa-se a transição para o regime pseudoplástico, com redução progressiva da viscosidade em função do incremento da taxa de cisalhamento. Tal fenômeno reológico é crítico para a modelagem operacional.

Diante da complexidade técnica e dos altos custos envolvidos nas operações em poços, a previsão precisa do comportamento do escoamento dos fluidos é crucial. O deslocamento de fluidos, como o fluido de perfuração pela pasta de cimento ou por um fluido espaçador, constitui um processo essencial na cimentação de poços. A eficácia desse deslocamento é fundamental para a garantia da segurança e da integridade do poço, bem como para a prevenção de problemas como influxo indesejado de fluidos (*kick*), colapso das paredes do poço, transporte ineficiente de cascalhos e falhas no isolamento de zonas durante a cimentação e o tamponamento.

Para otimização do deslocamento, é necessário integrar análises detalhadas das condições do poço, a geometria do mesmo e as propriedades reológicas dos fluidos envolvidos. Parâmetros operacionais, tais como a relação entre viscosidade e densidade dos fluidos, a excentricidade da coluna de revestimento, a vazão de bombeamento e as heterogeneidades geométricas exercem influência direta na dinâmica do escoamento. A literatura técnica reporta estudos experimentais e simulações computacionais que destacam a complexidade do escoamento em geometrias irregulares, nas quais a formação de zonas de baixa tensão (regiões de cisalhamento reduzido) pode induzir falhas de deslocamento. Em seções erodidas, por exemplo, a persistência de fluido de perfuração nas proximidades da parede do poço compromete a adesão e cura do cimento, elevando riscos de colapso, conforme ilustrado na Figura 1.1 [54].

Nesse contexto, a modelagem do escoamento anular de fluidos de perfuração, colchões e pastas de cimento é fundamental para a previsão de gradientes de pressão e eficiência de deslocamento. O presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo experimental para simulação da cimentação primária.

ria em condições controladas, com ênfase na reprodução de zonas erodidas e análise de cenários operacionais complexos. Neste estudo busca-se estabelecer correlações entre parâmetros reológicos, condições geométricas e eficácia do deslocamento, visando subsidiar protocolos de cimentação mais robustos e seguros para operações em poços de petróleo.

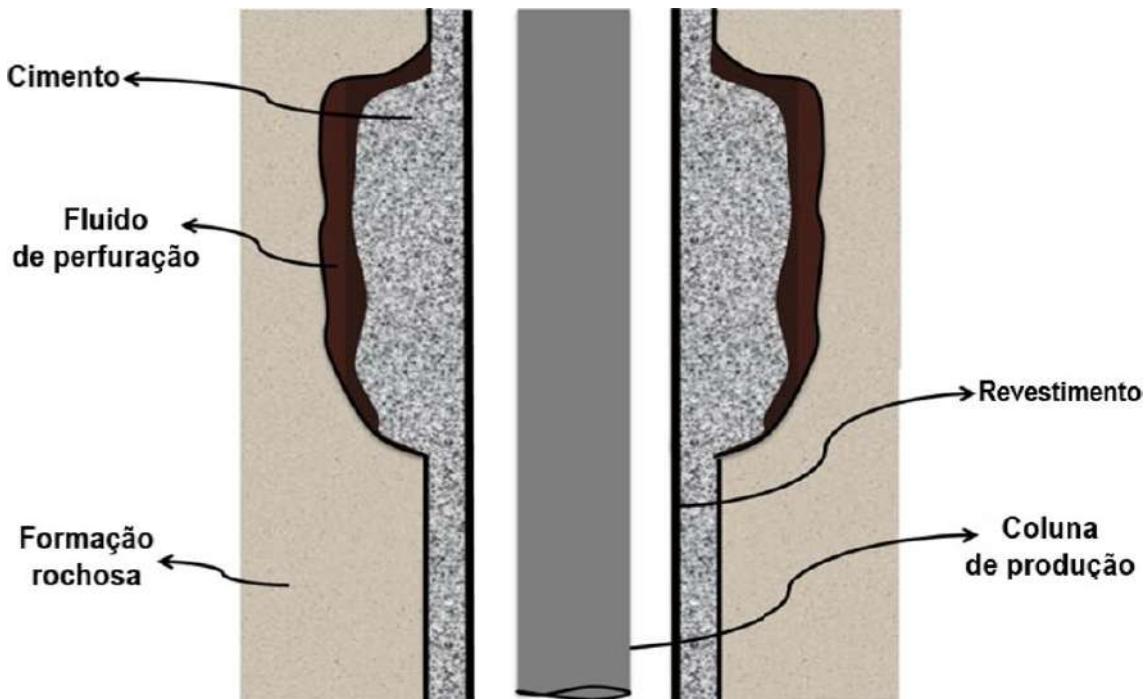


Figura 1.1: Processo de cimentação.

1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho é estudar experimentalmente o deslocamento de fluidos newtonianos e não newtonianos através de regiões alargadas. Pretende-se realizar uma análise paramétrica do problema, investigando a influência da vazão, da reologia, excentricidade e da inclinação na eficiência do deslocamento.

O capítulo seguinte apresenta a motivação do problema e o Estado da Arte. Em seguida, será apresentada a metodologia desenvolvida e os resultados obtidos. Finalmente, comentários finais e sugestões de trabalhos futuros são mostrados no último capítulo.

2

Revisão Bibliográfica

Na indústria do petróleo, a operação de cimentação primária desempenha um papel fundamental na garantia da integridade estrutural dos poços, com a sustentação mecânica sendo uma das principais funções, evitando colapso da estrutura, é crucial para prevenir, também, outros problemas críticos como migração de fluidos, *blowouts* e contaminação de aquíferos subterrâneos [18]. Esse processo, um dos mais relevantes na engenharia de poços, envolve o deslocamento dos fluidos de perfuração e do fluido espaçador pela pasta de cimento [18]. Os fluidos comumente utilizados (perfuração, espaçador e cimento) são geralmente modelados como fluidos de Bingham [19, 37, 29] ou por equações reológicas do tipo Herschel-Bulkley [27, 9, 24, 15, 34].

No deslocamento sequencial de fluidos os parâmetros geométricos de diâmetro e comprimento são relevantes em zonas de expansão-contração. Estudos sobre a influência dessas variáveis em escoamentos com fluidos newtonianos indicam que as cavidades menos abruptas e com maior comprimento geram menores regiões de recirculação quando comparadas a geometrias mais acentuadas [31, 45, 7]. Nessas geometrias mais acentuadas, a transição entre as seções de menor e maior diâmetro ocorre de forma brusca, com mudanças súbitas na área da seção transversal do canal. Tais características resultam em zonas de cisalhamento intenso e favorecem a formação de vórtices e recirculações, pois o escoamento não consegue se adaptar gradualmente à nova configuração geométrica.

Na área de simulações numéricas, [41] investigaram zonas de expansão-contração com fluidos de Bingham e observaram a formação de regiões de estagnação quando a razão de expansão ultrapassa um valor crítico. Para números de Bingham (Bn) baixos, foi observada a formação de uma região central com gradiente de velocidade desprezível, típica de uma *plug region*, que é a região do escoamento onde o fluido se move como um corpo sólido, sem cisalhamento, pois o esforço aplicado é menor que a tensão de escoamento. No entanto, a velocidade média nessa região mostrou-se levemente inferior àquela usualmente verificada em canais paralelos de geometria regular. Essa redução é atribuída às perturbações induzidas pelas variações geométricas do canal, que promovem redistribuições sutis do campo de tensões, afetando marginalmente o equilíbrio da região não escoada. Contudo, para Bn elevados, a velocidade superou a do escoamento padrão. [36] expandiram esse estudo para dutos com variações mais pronunciadas, identificando que a redução das áreas de

estagnação estava associada ao aumento das tensões cisalhantes ao longo do escoamento.

Trabalhos anteriores, como o de [58], já haviam demonstrado que essas regiões de estagnação tendem a se ampliar com o aumento da razão entre o diâmetro interno da cavidade e o da seção estreita do canal, apresentando diferenças qualitativas de acordo com a largura da cavidade. Os resultados indicam que, em cavidades suficientemente largas e com fluidos de alta tensão limite de escoamento, a profundidade da cavidade deixa de influenciar significativamente o escoamento. Nesses casos, a extensão lateral da geometria torna-se o principal fator determinante do comportamento do fluido. Esse comportamento está alinhado com os achados de [?] e [2], que demonstraram que a geometria do canal e a distribuição do campo de tensões controlam a formação e a morfologia das regiões não escoadas. A razão de expansão e o valor da tensão limite de escoamento determinam diretamente a extensão dessas zonas, reforçando que a forma e a abruptude das transições geométricas são tão determinantes quanto as propriedades reológicas do fluido.

[41] apuraram o escoamento de fluidos de Bingham em geometrias de *washout* 2D, considerando e desprezando efeitos iniciais [42, 43]. Os resultados mostram que o tamanho das regiões de estagnação diminuiu com o aumento do número de Reynolds ($0 \leq Re \leq 200$) até um valor crítico, além do qual passaram a crescer. Em regimes iniciais desprezíveis, a cavidade apresentou a maior região residual. Adicionalmente, para combinações de tensão limite de escoamento maiores e cavidades mais curtas, as zonas de estagnação tornaram-se independentes da profundidade. Estudos de [16] em contrações abruptas identificaram aquecimento viscoso significativo próximo à contração, fenômeno também observado em expansões abruptas por [17].

De acordo com as análises de [30], modelos de escoamento de fluido descritos pela equação de Bingham em expansões planares e axissimétricas com mesmo regime de escoamento que [42, 43], encontrando regiões de estagnação nos cantos das expansões. Conforme demonstrado pelos resultados, o aumento de Bn reduziu a recirculação para próximo de zero, independentemente do Re . Em contrapartida, [1] investigaram escoamentos tridimensionais de fluidos Herschel-Bulkley em expansão, demonstrando que a forma e localização das regiões estagnadas são influenciadas pela taxa de expansão, parâmetros reológicos e vazão.

[21] desenvolveram um estudo numérico do escoamento de fluidos modelados pelas equações de Herschel-Bulkley em uma expansão axissimétrica abrupta (razão 1:4), observando que o aumento da inércia ampliou o vórtice de canto, mas reduziu a região estacionária, garantindo assim que os vórtices

ajudassem no deslocamento dos fluidos remanescentes da cavidade. O comportamento *shear thinning* que ocorre por cisalhamento também diminuiu ambas as estruturas.

Experimentos com soluções de Carbopol [50, 58, 6, 5] destacaram seu comportamento viscoelástico em baixas tensões. [58] visualizaram a superfície de escoamento em expansões-contrações axissimétricas, mostrando que efeitos elásticos alteram sua topologia. Resultados numéricos de [33] e [31] corroboraram qualitativamente e diretamente com os resultados discutidos.

[58] integraram um estudo de análises experimentais e numéricas de escoamento viscoplásticos em expansões-contrações abruptas, demonstrando que regiões de estagnação diminuem com o aumento da tensão cisalhante na parede. [31] utilizaram o método dos volumes finitos (Ansys Fluent) para simular escoamentos com baixo Reynolds ($Re < 0,1$) em geometrias planas, modelando a reologia com a equação de [59].

[20] também estudaram escoamentos de Herschel-Bulkley mas desta vez em expansão-contração axissimétrica (de razão 1:6 até 3:1), identificando perda de simetria anterior-posterior sob efeitos inerciais ou elásticos, conforme observado experimentalmente por [58]. [44] analisaram escoamentos elastoviscoplásticos na mesma configuração, mostrando que a inércia desloca a superfície de escoamento no sentido do escoamento, enquanto a elasticidade a desloca em sentido oposto.

No contexto de deslocamento de fluidos, [32] correlacionaram eficiência de deslocamento entre dois fluidos (viscoplástico-newtoniano e vice-versa) com diferentes vazões, reologia e geometrias, concluindo que cavidades suaves (expansão-contração menos acentuadas) e fluidos viscoplásticos melhoram a eficiência. [12] implementaram o deslocamento de fluidos de Bingham por newtonianos em cavidades bidimensionais, observando que diferenças positivas de densidade e baixas vazões que otimizam a remoção, alinhando-se com estudos anteriores [28, 35, 3].

Com o avanço das tecnologias aplicadas à engenharia de poços e o aprimoramento das técnicas experimentais, novas bancadas experimentais têm sido desenvolvidas para investigar, em condições mais fiéis à realidade, o comportamento do deslocamento de fluidos durante a cimentação primária. Nesse contexto, [25] realizaram testes experimentais em seções anulares inclinadas, os quais foram posteriormente comparados com simulações numéricas tridimensionais [46] e com modelos bidimensionais baseados na média da abertura do anular [38, 39]. Tais estudos revelaram compatibilidades qualitativas relevantes entre os dados experimentais e computacionais, reforçando o impacto de zonas de *washout* em poços horizontais e inclinados. Posteriormente, [47]

ampliaram essa abordagem por meio de testes em escala real com pasta de cimento, visando representar de forma mais precisa as condições de campo, especialmente em anulares com grandes irregularidades.

[26] apresenta uma investigação experimental do deslocamento de fluidos em anulares com geometria irregular, simulando condições realistas de cimentação primária, especialmente em regiões com *washout*, que é a região do escoamento onde há acúmulo ou remoção anormal de fluido ou material, resultando em um alargamento no anular, causado por instabilidades no escoamento, não uniformidade na pressão e velocidade. Utilizando uma bancada de 10 metros e fluidos com propriedades reológicas similares às de campo, os autores aplicaram uma matriz de sondas de condutividade elétrica para rastrear a frente de escoamento entre fluidos miscíveis. Os resultados demonstraram que a frente de deslocamento tende a se inclinar devido à ação da gravidade, favorecendo a migração do fluido mais denso pela parte inferior do anular, revelando assimetrias marcantes na distribuição dos fluidos. A metodologia proposta mostrou-se eficaz, reproduzível e de baixo custo, sendo uma ferramenta promissora para a validação de modelos numéricos simplificados [39].

[22] investigaram o deslocamento de fluidos em anulares excêntricos com rotação do tubo interno, revelando que a presença de escoamento azimutal do tipo *Couette*, induzido pela rotação, altera significativamente a simetria da frente de escoamento e favorece a remoção de fluido residual nas regiões inferiores do anular. Essa redistribuição do fluido é altamente dependente da geometria do poço e das propriedades reológicas dos fluidos envolvidos. [40], por sua vez, concentraram-se na análise tridimensional de deslocamentos horizontais com fluidos do tipo *shear thinning*, comparando cenários com e sem rotação da coluna. Suas simulações demonstraram que a rotação promove um escoamento mais uniforme e eficiente, especialmente em regiões de excentricidade moderada, além de melhorar a cobertura da interface cimento-formação, fator determinante para garantir o isolamento zonal.

[51] também abordaram o papel do movimento da coluna na eficiência da cimentação, por meio de um modelo numérico que simula o deslocamento de fluidos de completação em anulares com diferentes configurações geométricas. O estudo conclui que, comparada à reciprocidade, a rotação contínua da coluna é mais eficaz para promover o deslocamento do fluido de perfuração, sobretudo em condições de excentricidade intermediária, devido à sua capacidade de gerar um escoamento mais estável e envolvente ao redor da circunferência do anular.

Mais recentemente, [48] realizaram uma análise computacional tridimensional detalhada do deslocamento de fluidos newtonianos em anulares horizontais.

tais com rotação da coluna. O estudo expandiu a faixa de parâmetros operacionais analisados, incluindo variações na razão de viscosidade, intensidade da rotação, geometria do anular e efeitos de inércia e gravidade. Os resultados obtidos demonstraram boa concordância com dados experimentais de [26], validando o modelo numérico proposto. Além disso, a simulação permitiu observar fenômenos hidrodinâmicos difíceis de capturar experimentalmente, como a formação de padrões instáveis na interface fluido-fluido e a influência do perfil de velocidade azimutal sobre a eficiência da substituição.

Complementando essa abordagem, [49] realizaram uma análise computacional tridimensional do deslocamento laminar em anulares excêntricos com rotação da coluna, validada também com dados experimentais de [26]. Os autores demonstraram que a rotação da coluna gera um escoamento azimutal adicional do tipo *Couette*, o qual pode melhorar a eficiência do deslocamento em situações com razão de viscosidade moderada. O estudo esclarece que parâmetros como excentricidade, inclinação, velocidade de rotação e diferença de densidade exercem influência direta sobre a eficiência de deslocamento na região estreita do anular. A validação das simulações com dados da bancada experimental corrobora a robustez do modelo desenvolvido, que se mostra eficaz para analisar instabilidades na interface entre os fluidos e para prever o desempenho do processo em geometrias mais complexas.

[4], através de estudos experimentais com fluidos viscoplásticos em regime turbulento, evidenciaram que a excentricidade do anular favorece a formação de fluido residual, reduzindo significativamente a eficiência de deslocamento. Com uma outra abordagem,[56, 57] aprofundaram o entendimento desses fenômenos em regime laminar, com foco na formulação e validação do modelo dispersivo bidimensional (*Dispersive Two-Dimensional Generalized Algorithm*), capaz de capturar efeitos de dispersão que normalmente são negligenciados por modelos estudados na literatura. Na parte 2 de seu estudo, é proposta uma classificação dos regimes de escoamento observados experimentalmente, identificando como o número de empuxo, número de Reynolds, razão de viscosidade e excentricidade influência na dispersão da interface quanto no escoamento secundário no anular. Uma estratégia observada por [23] demonstra que a rotação da coluna interna pode ser uma eficaz na operação, ao promover escoamento helicoidal e favorecer a redistribuição do fluido deslocado ao longo da seção anular.

Irregularidades geométricas (como zonas erodidas) geram padrões complexos, com recirculações e estagnações amplificadas por fluidos viscoplásticos. As análises em anulares alargados [32, 13, 11] revelaram que cavidades alongadas mantêm uma quantidade relevante de fluidos residuais, enquanto efeitos inerciais distorcem interfaces. [54] identificaram que a distribuição espacial

entre zonas de escoamento e zonas estáticas do fluido apresenta assimetria lateral. Este fenômeno foi associado à presença de tensões elásticas dos fluidos residuais.

Apesar dos avanços, lacunas persistem em sistemas trifásicos em zonas alargadas, tema central desta dissertação. A maioria dos estudos limita-se a sistemas binários ou simulações parcialmente validadas. Neste trabalho avança nesse desafio ao propor uma metodologia experimental inédita, analisando deslocamentos em anulares com expansão-contração sob variações de reologia (fluidos newtonianos/não newtonianos miscíveis/imiscíveis), excentricidade, vazão e inclinação da bancada, avaliando interações entre forças viscosas, inerciais e gravitacionais.

3

Metodologia

A eficiência do deslocamento de fluidos em poços durante operações de perfuração e completação depende da reologia dos fluidos, aspectos geométricos do poço e vazão de bombeio. Com o objetivo de assegurar o sucesso dessas operações, modelos simplificados de escoamento são comumente adotados para avaliação da estabilidade do deslocamento, evitando-se assim custos elevados de procedimentos experimentais e o alto custo computacional de modelos completos.

A fim de estudar a hierarquia de densidade, influência da vazão, efeitos viscosos e geométricos do deslocamento, serão descritos nesse capítulo os materiais, técnicas desenvolvidas e tecnologias usadas para esta abordagem experimental. Ademais, serão descritos os testes reológicos executados para obter as características dos fluidos utilizados.

Uma bancada experimental, que foi construída e validada em projetos anteriores do GReo/PUC-Rio, permitiu a realização dos experimentos com 2 fluidos em anulares concêntricos e excêntricos, e com diferentes diâmetros e comprimentos. Ela foi reaproveitada neste trabalho e algumas mudanças foram necessárias para viabilizar a injeção de um terceiro fluido, sem a necessidade de desligar a bomba e minimizando os efeitos de variação da vazão ao abrir e fechar válvulas. Mais detalhes sobre o procedimento experimental serão apresentados nas seções a seguir.

3.1

Procedimento Experimental

O aparato experimental foi construído a fim de simular o processo de deslocamento dos fluidos durante a cimentação primária. A Figura 3.1 mostra o esquema do arranjo experimental.

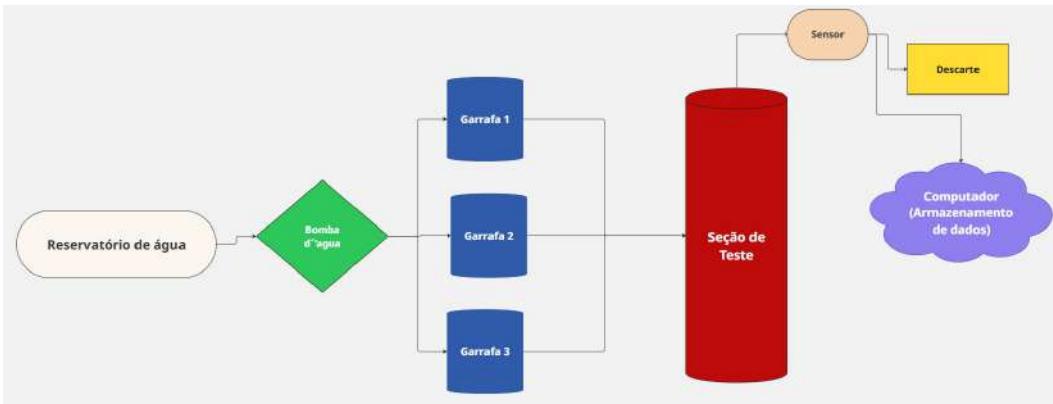


Figura 3.1: Fluxograma do processo experimental.

Observando a Figura 3.1 da esquerda para direita, inicialmente está o reservatório de água que abastece todo o sistema. Em seguida, fica a bomba de água, responsável por impor uma vazão constante que empurra o pistão de cada garrafa de transferência. A bomba abastece as garrafas de transferências em ordem, a primeira com o fluido um, a segunda com o fluido dois e a terceira com o três, com objetivo de preencher toda geometria. Cada garrafa de transferência tem seu circuito de mangueiras independente. O escoamento no anular é feito de baixo para cima, a fim de simular o retorno dos fluidos do fundo do poço para superfície, dessa forma o experimento é mais fiel ao processo encontrado em campo. Para garantir que os fluidos não se misturem antes do início do experimento, realiza-se inicialmente o bombeamento reverso de uma pequena quantidade de cada fluido (na ordem 3, 2 e 1) sem que entrem na seção experimental. Esse procedimento tem como objetivo preencher as válvulas com seus respectivos fluidos, assegurando a separação adequada entre as fases e evitando a formação de possíveis bolhas durante o ensaio. Então, o espaço anular (seção de teste) é preenchido pelo fluido que será deslocado (fluido 1) que simula o fluido de perfuração. Na sequência, entra o fluido deslocador (fluido 2) a fim de representar o fluido espaçador utilizado nessa operação, para então iniciar o primeiro processo de deslocamento dos fluidos. Itando investigar diversas vazões de injeção. Após a passagem de dois volumes da própria geometria (esse valor pode ser observado na saída de dados do sensor de Coriolis) é manipulado o jogo de válvulas para começar a segunda etapa de deslocamento com o fluido 3. Esse fluido simula a pasta de cimento dentro do poço. No topo da seção de testes é utilizado um medidor Coriolis que transmite para um computador a vazão, a temperatura e a densidade da fração de fluido na saída em intervalos de um milisegundo. O volume de fluido saindo do densímetro passa direto para o reservatório de descarte. Este procedimento é repetido várias vezes com diferentes vazões de injeção ($2,2 \times 10^{-6} m^3/s$,

$4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$), excentricidades (100%, 50%, 25% e 0%) e ângulos de inclinação da bancada (0° , 30° e 60°).

As vazões foram definidas da seguinte forma: a menor vazão, de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$, corresponde à melhor condição operacional possível para a bomba utilizada. A partir dessa referência, a vazão foi gradualmente aumentada até atingir o dobro desse valor e, posteriormente, o quádruplo, resultando em uma vazão máxima de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$. Vazões superiores a essa comprometeriam a integridade da bancada experimental.

As inclinações foram obtidas por meio de um suporte em formato triangular, permitindo ajustes em dois ângulos distintos: 30° e 60° .

Não foi possível investigar outras combinações de vazões e inclinações devido a limitações experimentais.

3.2 Bancada experimental

A Figura 3.2 apresenta a bancada experimental, na qual há apenas uma bomba para injetar os três fluidos. Essa bomba foi projetada para trabalhar com água, portanto usamos três garrafas de transferência (onde a água desloca o pistão, o qual desloca o fluido de interesse) e um sensor Coriolis que capta o histórico temporal de densidade, vazão mássica e volumétrica.

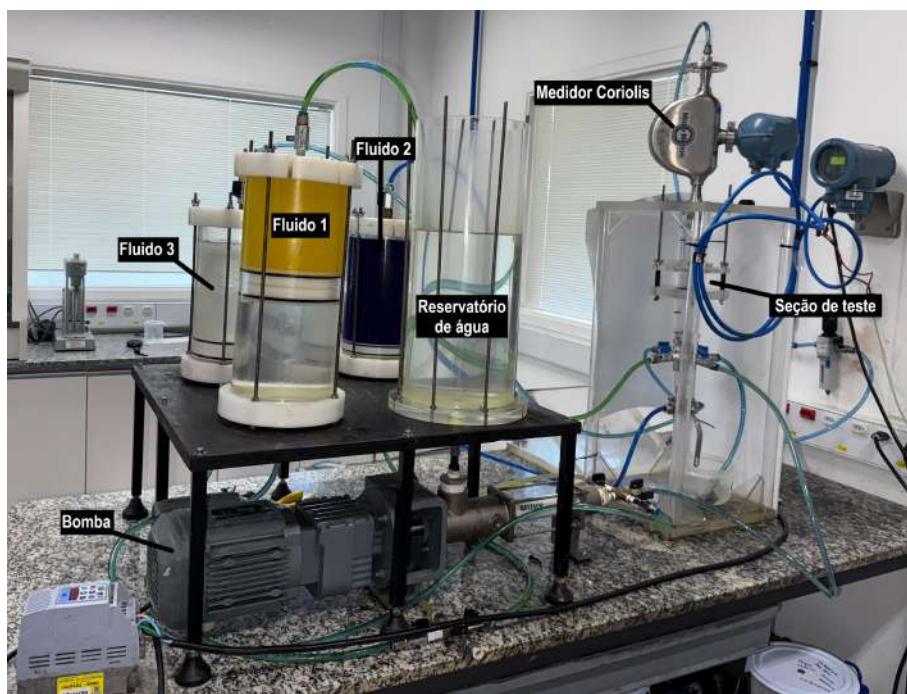


Figura 3.2: Bancada experimental.

3.2.1

Seção de teste

A Figura 3.3 apresenta do lado esquerdo um desenho esquemático de um poço irregular e a imagem da direita ilustra a simplificação realizada neste trabalho. Durante a perfuração, a broca não produz um diâmetro perfeitamente uniforme ao longo do poço, porque o processo envolve a interação mecânica entre a broca e a formação rochosa, que possui heterogeneidades naturais (variações de dureza, fraturas, falhas e descontinuidades). Além disso, vibrações, desvio da trajetória, desgaste desigual dos dentes da broca e o fluxo do fluido de perfuração contribuem para que o diâmetro real seja maior ou menor que o nominal da ferramenta. Como resultado, o poço pode apresentar alargamentos (*washouts*), regiões irregulares e variações de seção, tornando o contorno do diâmetro não uniforme. Para fins de modelagem e simplificação, observou-se na literatura que essa abordagem representa uma boa aproximação para o estudo em questão. Dessa forma, considerou-se a presença de um único alargamento representativo. As dimensões adotadas foram baseadas em trabalhos anteriores, como o de [10].

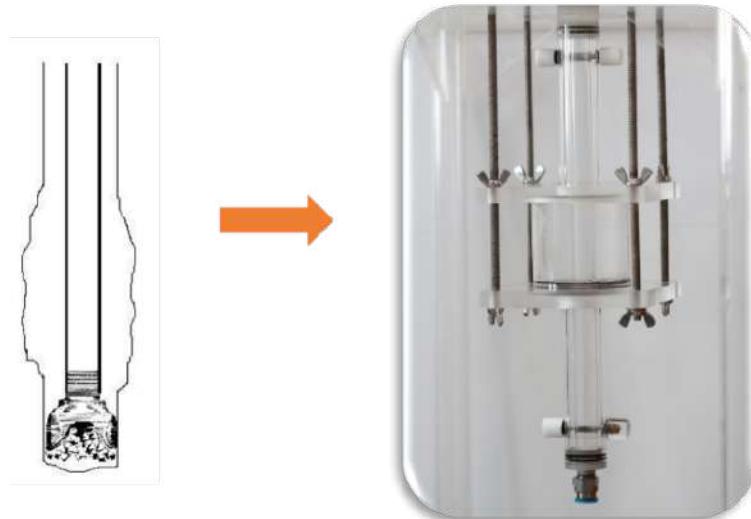


Figura 3.3: Simplificação da geometria.

A seção de teste simula o espaço anular com diferentes excentricidades e que possui expansão-contração abrupta. Ela consiste em dois tubos concêntricos, com um tubo interno que contém ajuste por rosca (para variação da excentricidade), representando a coluna de perfuração. A Figura 3.4 apresenta um esquemático 3D da seção de teste e a Figura 3.5 ilustra seu respectivo desenho esquemático. Como pode ser mostrado no esquemático, a expansão-contração foi posicionada equidistante entre as seções retas. A região foi fixada

por meio de O-ring de borracha e hastes de parafusos de fixação, a discos de acrílico fixados previamente ao espaço anular contínuo.

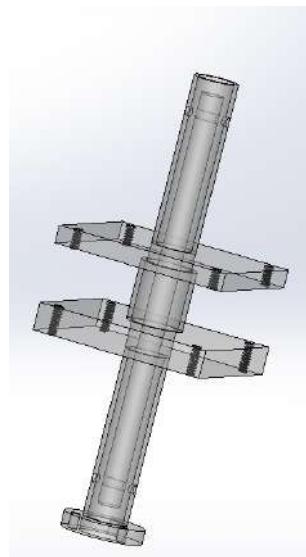


Figura 3.4: Seção de teste em 3D.

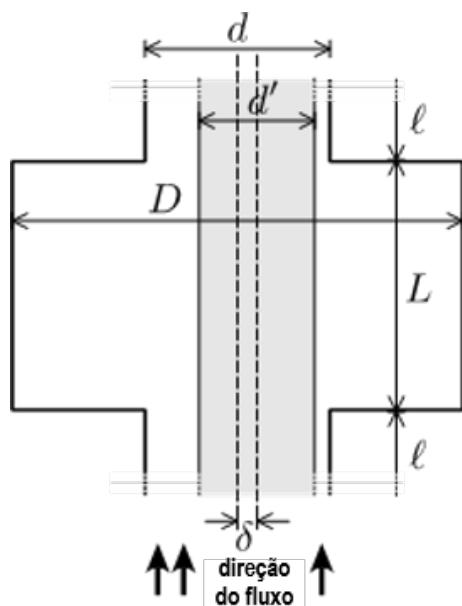


Figura 3.5: Desenho esquemático.

As dimensões da seção de testes são:

$$L = 40.5\text{mm}$$

$$l = 13\text{mm}$$

$$D = 31.7\text{mm}$$

$$d = 24\text{mm}$$

$$d' = 15\text{mm}$$

$$0 < \delta < 4.5\text{mm} \text{ (excentricidade variável entre 0 e 100\%)}$$

A excentricidade anteriormente mencionada será abordada através do conceito de *standoff* (STO), um termo amplamente utilizado no setor petrolífero para descrever a distância ou separação entre dois elementos, geralmente em ambiente de poço. Este termo refere-se à posição relativa à periferia do revestimento em relação ao centro do poço, diminuindo o grau de descentralização do revestimento. Este parâmetro é essencial para garantir que o cimento circule de maneira uniforme ao redor da coluna de revestimento, preenchendo o espaço anular entre a tradição e a formação.

A equação que rege este impasse é:

$$STO = \left(\frac{X}{d' - d} \right) \times 100 \quad (3-1)$$

Definindo X como:

$$X = \left(\frac{(d' - d) - 2\delta}{d' - d} \right) \quad (3-2)$$

O valor de X é a distância entre a parede externa do tubo interno e a parede interna do tubo externo. O valor de d' é o diâmetro externo do tubo, correspondente ao diâmetro do poço, enquanto o valor de d refere-se ao diâmetro externo do revestimento. Deste modo, um valor de STO igual a zero indica que o revestimento está em contacto com a parede do poço, enquanto um valor de 100% corresponde a um caso completamente concêntrico.

3.2.2 Circuito hidráulico

Diante da dificuldade de encontrar no mercado um conjunto de válvulas hidráulicas com mais de 2 vias e que respeitasse as dimensões da bancada, projetamos e construímos um sistema hidráulico para viabilizar testes com injeção sequencial de 3 fluidos (Figuras 3.6 e 3.7). Este é composto por um cilindro de alumínio com um grau na entrada da seção de testes para minimizar a formação de bolhas. Ademais, contém uma válvula de 2 vias em “L” na região inferior, que permite a mudança da injeção do fluido 2 para o fluido 3. Também possui outras 4 válvulas na lateral, as quais viabilizam a injeção do fluido 1, a purga do sistema para retirar bolhas, a injeção de produtos de limpeza e solventes e de ar para otimizar o processo de limpeza.



Figura 3.6: Hurb de válvulas.



Figura 3.7: Jogo de válvulas.

Para injeção dos fluidos foram usadas válvulas tipo mini registro (Figura 3.8), com entrada por engate rápido. Ao todo são quatro válvulas individuais para entrada de água, ar comprimido, entrada do fluido deslocado (fluido 1) e uma para sangria dos fluidos, a fim de eliminar possíveis bolhas dentro da secção de testes.



Figura 3.8: Válvula tipo registro.

Na segunda etapa do experimento é injetado o fluido 3 sem parar a entrada do fluido 2, para isso foi utilizada uma válvula de esfera direcional de fluxo classe 300 “L”, que com apenas um movimento é possível mudar o curso do escoamento para a entrada do fluido posterior. A válvula com esfera em L (Fig. 3.9), é localizada na parte inferior da seção de teste, suas entradas receberam engates rápidos para acoplar as mangueiras que chegam das garrafas de transferência.



Figura 3.9: Válvula de esfera em "L".

3.2.3

Medidor de vazão e densidade

Um medidor de vazão e densidade (Fig.3.10), fornecido pela Emerson, modelo MicroMotion CMFS015M, foi posicionado na saída da seção de teste. O Micro Motion CMFS015M é um medidor de vazão mássica que opera com base no efeito Coriolis. Em seu interior, tubos são mantidos em vibração controlada e, na ausência de fluxo, os sinais gerados a montante e a jusante estão em fase. Quando o fluido passa pelos tubos, a inércia da massa em movimento induz uma torção que provoca uma defasagem entre esses sinais, diretamente proporcional à vazão de massa. Ao mesmo tempo, a frequência natural de vibração do conjunto varia conforme a densidade do fluido, permitindo que o instrumento forneça também esse parâmetro. Combinando a vazão mássica e a densidade, o equipamento calcula a vazão volumétrica, garantindo medições simultâneas, estáveis e de alta precisão.



Figura 3.10: Medidor de vazão e densidade baseado no princípio do efeito Coriolis.

3.2.4

Bomba

A bomba utilizada é da marca NETZSCH, modelo NEMO® NM015BY02S12B (Figura 3.11), que é uma bomba rotativa volumétrica de deslocamento positivo. A componente chave do sistema de bombeio é o conjunto rotor/estator. O rotor é um helicoide rosulado de passo largo e núcleo, que gira no interior do estator o qual tem um passo duplo em relação ao rotor. A energia é transmitida ao líquido em forma de pressão. O movimento helicoidal (axial + radial) do líquido dentro da bomba representa velocidade, direção e sentido iguais aos dos rotores. Acoplado à bomba é utilizado uma inversor de frequência programável WEG CFW08 para controle de vazão, um controle V/F (escalar) e um controle vetorial sensorless (VVC: voltage vector control) programáveis.



Figura 3.11: Corte da seção transversal da bomba.

3.3 Fluidos utilizados

3.3.1

Caso newtoniano

Nos experimentos, foram empregados três fluidos newtonianos: óleo de soja (fluido 1), água (fluido 2) e glicerina (fluido 3). As viscosidades desses fluidos foram determinadas por meio de um viscosímetro capilar, enquanto as densidades foram medidas em densímetro de bancada da marca Anton Paar, modelo DMATM 4500 M.

3.3.2

Caso não newtoniano

Os fluidos de campo utilizados nos testes são fluidos de perfuração sintéticos com base olefina que foram fornecidos pela Petrobras. Eles têm densidades teóricas de 10, 12 e 16 ppg (*pounds per galon*) e foram adensados com baritina. A ordem da injeção dos fluidos é definida como: primeiro o de 10 ppg, em seguida o de 12 ppg e por fim o de 16 ppg. As caracterizações reológicas foram feitas no reômetro rotacional da marca TA Instruments, modelo DHR-3. As densidades foram medidas no densímetro de bancada da marca Anton Paar, modelo DMATM 4500 M.

Com o objetivo de visualizar e compreender fenômenos que, visualmente, são impossíveis com fluidos opacos, foram realizados testes com fluidos modelos, a saber soluções aquosas de Carbopol®. O fluido 1 é composto por água com uma concentração de 0,10% de Carbopol®, o fluido 2 é constituído por 60% de glicerina como base, combinada com 0,15% de Carbopol®, e o fluido 3 é formado por 80% de glicerina como base, combinada com 0,20% de Carbopol®.

O cenário estudado foi restrito à condição favorável, uma vez que considerar a hierarquia favorável representaria adicionar mais uma variável à análise. Como o trabalho já envolve uma grande quantidade de parâmetros a serem discutidos, optou-se por limitar o estudo a essa condição específica.

3.3.2.1

Preparo dos fluidos modelo

O Carbopol é um polímero de ácido acrílico de alto peso molecular com ligação cruzada. É frequentemente usado pela indústria farmacêutica, cosmética e alimentícia como agente estabilizante, para aumentar a viscosidade e preparar suspensões e géis. No meio acadêmico, é considerado ideal para experimentos de visualização pois é um gel transparente, com tensão limite de escoamento e sem efeitos significativos envelhecimento [52].

O procedimento de preparo adotado foi baseado em [52] e no trabalho em [8]. O processo de formulação de fluidos à base de Carbopol segue protocolos meticulosos para garantir homogeneidade, estabilidade química e reprodutibilidade reológica. Inicia-se com a dispersão gradual do polímero em água destilada, utilizando misturadores mecânicos para evitar aglomeração de partículas e formação de bolhas de ar. O ajuste do pH constitui uma etapa crítica para ativar as propriedades reológicas do Carbopol, sendo realizado com agentes alcalinos, como o hidróxido de sódio (NaOH), sob constante agitação dos misturadores mecânicos. Esta etapa é fundamental para formar a rede tridimensional responsável pelo aumento da ocorrência e pela tensão limite de escoamento.

3.4

Caracterização dos fluidos

3.4.1

Densidades

Todos os fluidos foram caracterizados no densímetro de bancada Anton Paar DMATM 4500 M, mostrado na Figura 3.12, que consiste em preencher completamente o capilar interno do equipamento com o fluido e selecionar para mensurar a propriedade. Esse procedimento deve ser repetido três vezes para se obter uma boa exatidão no resultado e eliminar qualquer tipo de flutuação no resultado.



Figura 3.12: Anton Paar DMA 4500 M.

3.4.2

Viscosidades dos fluidos newtonianos

A viscosidade cinemática é medida usando um viscosímetro capilar do tipo Ubbelohde (Fig. 3.13). Esse dispositivo é caracterizado por ter o menisco inferior suspenso, logo abaixo do capilar de medição.



Figura 3.13: Viscosímetro *Ubbelohde* e o banho termostático.

3.4.3

Testes preliminares para determinar a viscosidade dos fluidos não newtonianos

Para efeitos de comparação com a prática industrial, foram realizados testes preliminares no viscosímetro rotacional Fann 35A (Fig.3.14), equipamento amplamente utilizado em plataformas e operações de campo. A caracterização reológica completa, por sua vez, foi conduzida posteriormente em reômetro, a partir das amostras coletadas.



Figura 3.14: Viscosímetro Fann 35A.

O viscosímetro rotacional consiste em um cilindro externo, chamado de rotor (Fig. 3.15) à esquerda), que sofre a imposição de uma velocidade angular constante controlada por um jogo de engrenagens. Na parte interna, possui um cilindro denominado Bob (Fig. 3.15) à direita) que é fixado em uma haste e imposto um torque devido ao fluxo viscoso, que por sua vez é transmitido a uma mola de deflexão e de acordo com essa deformação o ponteiro marca na parte superior do viscosímetro.



Figura 3.15: Rotor e o *Bob* do viscosímetro.

A determinação da viscosidade e da tensão em um fluido ocorre por meio de equações definidas na recomendação prática API 13B-2. Utilizando essas informações, é possível gerar uma curva de escoamento que representa o comportamento do fluido sob diferentes condições de cisalhamento. Conforme as normas API, referências importantes para a caracterização reológica de fluidos de perfuração, a recomendação padrão é a utilização da combinação de geometria R1B1.

3.4.3.1

Metodologia para caracterização no viscosímetro

A fim de garantir precisão e repetibilidade dos resultados ao realizar testes no viscosímetro Fann 35A, é crucial seguir uma série de procedimentos específicos. Utilizou-se a geometria Bob lisa, por ser a única disponível comercialmente. Isso ocorre porque as combinações de rotor e bob oferecem diferentes faixas de taxa de cisalhamento, devido às variações nos tamanhos de folga mecânica entre eles. Nesta pesquisa foi usada a mesma metodologia experimental do trabalho de Camila Moreira [8], que será descrita a seguir.

1. Posicionar o bob no Fann, deve-se empurrá-lo para cima enquanto o gira no sentido horário.
2. Posicionar o rotor no cabeçote, externamente concêntrico ao bob, deve empurrá-lo para cima enquanto o gira no sentido horário.
3. Certifique-se de que a leitura no mostrador esteja zerada. Faça ajustes mínimos no "bob" até alcançar a marca zero.
4. Colocar o fluido no copo, até que atinja a quantidade de 350 ml.
5. Posicione o copo na plataforma móvel, elevando-o até que o fundo do bob esteja a uma altura de 1,57 cm do fundo do copo, conforme recomendado pelo fabricante.
6. tem Verifique se o fluido alcançou a marca na parte superior do rotor para garantir que o rotor e o bob estejam imersos na profundidade adequada. Adicione mais fluido, se necessário, e aguarde o equilíbrio térmico.
7. Estabeleça a velocidade de 600 rpm por 1 minuto.
8. Realize a leitura da deflexão 0 a 600 rpm.
9. Repita os passos 6 e 7 para as seguintes velocidades de rotação: 300, 200, 100, 6 e 3 rpm.
10. Repita os passos 6 e 7, iniciando com a velocidade de 3 rpm, para as seguintes velocidades de rotação: 3, 6, 100, 200, 300 e 600 rpm, obtendo assim medidas descendentes e ascendentes.
11. Repita as medidas descendentes, aumentando o tempo de espera para cada medida, a fim de obtê-las em regime permanente.

Com cada ponto medido, foi possível traçar a curva de escoamento e analisar individualmente cada um dos fluidos.

3.4.4

Reologia dos fluidos não newtonianos

Para a caracterização dos fluidos não newtonianos foi utilizado um reômetro rotacional, modelo DHR-3, da marca TA Instruments (Figura 3.16). Esse é um reômetro de tensão controlada caracterizado pela presença do atuador e do transdutor no mesmo eixo. Portanto, tanto a tensão aplicada quanto a deformação medida são registradas na fixação superior do reômetro.



Figura 3.16: Reômetro rotacional.

A escolha da geometria depende dos fluidos utilizados e das particularidades de cada geometria. Para os fluidos utilizados foi utilizada a geometria *Couette* (Fig.3.17). A geometria ranhurada foi escolhida para evitar o deslizamento aparente do fluido, especialmente em baixas taxas de cisalhamento. Além disso, esse tipo de geometria minimiza a sedimentação dos fluidos durante o experimento, garantindo a estabilidade das medidas ao longo do tempo.



Figura 3.17: Geometria Couette ranhurado.

3.4.4.1

Pré teste

Antes de realizar os testes no reômetro, é essencial compreender por quanto tempo os fluidos mantêm sua integridade dentro da geometria do reômetro. Por isso, foram realizados dois testes para determinar o tempo de estabilidade dos fluidos: o teste da proveta e o teste no equipamento Turbiscan da marca Formulaction. O teste da proveta consiste em colocar uma quantidade de fluido em uma proveta graduada até a última marca da escala e, em determinados intervalos de tempo, observar se houve separação do fluido. O período de observação escolhido foi de 8 dias, com fotos tiradas na primeira hora, no dia seguinte e após os 8 dias, conforme mostrado na Figura 3.18.

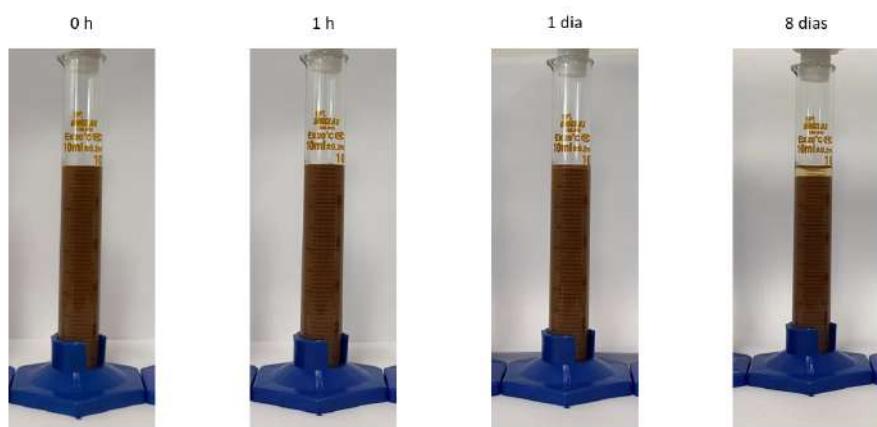


Figura 3.18: Teste estabilização – fluido 16 ppg.

Foi observada sedimentação ao longo do tempo, em 1 dia de teste havia uma pequena camada de olefina separada na parte superior do fluido. Após 8 dias, essa mesma camada apresentou volume de 0,4 mL. Visto isso, realizou-se testes no avaliador de estabilidade para observar com maior precisão o fenômeno da sedimentação.

Para análise foram adicionados cerca de 20 mL de amostra em um frasco específico do equipamento, como mostra a Figura 3.19. O teste consiste em confinar a amostra em uma câmara escura e realizar varreduras em intervalos de tempo determinados pelo operador. O intervalo de tempo escolhido para as varreduras foi de 5 minutos, com uma duração total de 8 dias.

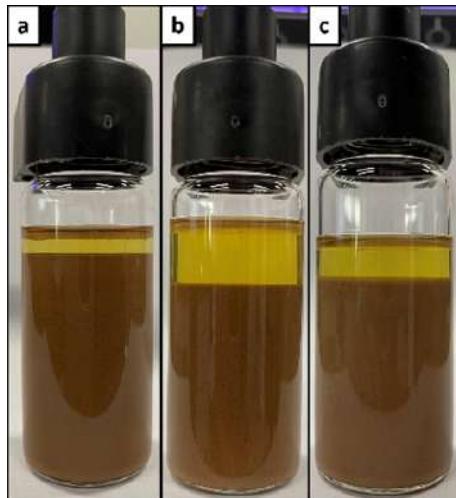


Figura 3.19: Fluidos de perfuração a) 16 ppg, b) 12 ppg e c) 10 ppg.

Com a conclusão das análises de estabilidade dos fluidos, foi possível compreender os comportamentos de sedimentação de cada um e elaborar gráficos que serão discutidos em capítulos seguintes.

3.4.4.2

Teste de varredura da amplitude de tensão

O ensaio oscilatório de varredura de amplitude de tensão, realizado em regime de baixas deformações, permite caracterizar a resposta viscoelástica de fluidos complexos por meio da análise simultânea dos componentes elástico e viscoso. Nesta metodologia, aplica-se uma deformação senoidal $\gamma(t) = \gamma_a \sin(\omega \cdot t)$, onde γ_a corresponde à amplitude de deformação e ω à frequência angular, enquanto medem-se os módulos de armazenamento (G') e dissipação (G''). Esses parâmetros reológicos, definidos conforme as equações abaixo, quantificam respectivamente a energia armazenada elasticamente e a dissipada viscosamente por ciclo de deformação:

$$G' = \frac{\tau'_a}{\gamma_a} \quad (3-3)$$

$$G'' = \frac{\tau''_a}{\gamma_a} \quad (3-4)$$

De forma que ω é a frequência, τ'_a a amplitude de tensão e $\gamma_a = \frac{\gamma(t)}{\sin(\omega \cdot t)}$ a amplitude de deformação aplicada [52].

Uma das funções deste teste é delimitar a região viscoelástica linear, em outras palavras, a região de baixas amplitudes caracterizadas pela dependência

linear entre a tensão e deformação. Quando a amplitude de tensão está na região viscoelástica linear, os módulos permanecem constantes e não variam com a amplitude de tensão. Em contrapartida, quando a amplitude de tensão está fora da região da viscoelástica linear, o G'' diminui com amplitude e os módulos perdem seus significados físicos neste teste [52].

Define-se, então, o valor máximo da amplitude de tensão, $\tau_{a,max}$, para que o material mantenha sua estrutura, sem escoamento, e com módulos constantes e independentes da amplitude para uma determinada frequência. Outros testes oscilatórios, como a varredura de tempo, são realizados dentro dessa região viscoelástica linear.

Além disso, o teste de varredura de amplitude de tensão é utilizado para estimar a tensão limite de escoamento. Geralmente, $\tau_{a,max}$ é maior que τ_y , pois no teste oscilatório a microestrutura se desintegra em um curto período, enquanto no teste de tensão constante, τ_y é determinado após um tempo suficientemente longo. No entanto, a ordem de grandeza da tensão limite de escoamento pode ser estimada, facilitando a realização do teste de tensão constante e a obtenção da curva de escoamento.

3.4.4.3

Teste de varredura de tempo

O ensaio oscilatório de varredura de tempo monitora as alterações na microestrutura do fluido em resposta a condições reológicas mantidas constantes, sendo particularmente relevante para investigar fenômenos como sedimentação, evaporação e tixotropia. Nesta metodologia, aplica-se uma deformação senoidal com frequência angular ω e amplitude de tensão τ_a fixas, esta última definida dentro da região viscoelástica linear previamente delimitada. A estabilidade microestrutural é inferida pela invariância temporal dos módulos G' (elástico) e G'' (viscoso), enquanto flutuações nesses parâmetros indicam rearranjos estruturais ou degradação progressiva.

O objetivo principal do teste é determinar o tempo de estabilidade característico t_{max} , correspondente ao intervalo durante o qual a amostra mantém propriedades reológicas estáveis. Esse parâmetro é crítico para assegurar a confiabilidade de ensaios subsequentes, como varreduras de frequência ou testes de relaxação, que exigem integridade microestrutural ao longo de sua execução. Em fluidos tixotrópicos, por exemplo, a recuperação gradual de G' após cisalhamento intenso pode ser quantificada.

3.4.4.4

Teste com taxa de deformação constante

Neste procedimento, uma taxa de deformação constante é imposta e é monitorada a alteração na tensão de cisalhamento (ou viscosidade) ao longo do tempo. Quando essa alteração temporal da tensão não existir, identificamos o tempo associado ao regime permanente, conhecido como $t_{regperm}$. Tipicamente, esse período é proporcional ao inverso da taxa de deformação aplicada ($t_{regperm} \simeq \frac{1}{\dot{\gamma}}$). Portanto, um teste preliminar é conduzido, onde é aplicada uma taxa de deformação $\dot{\gamma} = 0,01 s^{-1}$, com o objetivo de estimar o tempo mínimo para alcançar o regime permanente. Esse tempo é importante para a realização da curva de escoamento, sendo utilizado como um dado de entrada.

3.4.4.5

Curva de escoamento

O teste da curva de escoamento apresenta a tensão, ou viscosidade, em função da taxa de deformação em regime permanente. Desta forma, é obtida uma das informações reológicas mais utilizadas na prática de engenharia. Impondo um valor de taxa de deformação para cada ponto, é realizada uma leitura dos dados resultantes e contabiliza-se este valor. Depois é obtido de 3 pontos consecutivos com tolerância menor ou igual 0,1%, assumindo que o regime permanente foi alcançado. Com isso, a medida desses 3 pontos representa um ponto do gráfico da função $\tau(\dot{\gamma})$.

3.4.5

Adimensionalização dos dados

Para viabilizar a comparação entre os resultados dos diferentes cenários investigados, adimensionalizar-se o volume:

$$V^* = \frac{v_i}{V_{ref}} \quad (3-5)$$

Sendo:

- $v_i \rightarrow$ Volume de cada ponto em t_i .
- $V_{ref} \rightarrow$ Volume total da geometria.

O número de Reynolds foi calculado com a seguinte equação:

$$Re = \left(\frac{\rho v_m D_h}{\eta(\dot{\gamma}_c)} \right) \quad (3-6)$$

Sendo ρ a densidade, v_m a velocidade média, $D_h = d - d'$ o diâmetro hidráulico:

$$v_m = \frac{4Q_m}{\pi(d^2 - d'^2)} \quad (3-7)$$

O $\eta(\dot{\gamma}_c = \frac{v_m}{D_h})$ a viscosidade considerando que os mesmos foram modelados pela equação de Herschel-Bulkley, definida como segue:

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}_c} + K\dot{\gamma}_c^{(n-1)} \quad (3-8)$$

Onde Q_m é a vazão média, τ_y é a tensão limite de escoamento, K é o índice de consistência e n é o índice de lei de potência.

Para os fluidos newtonianos a equação é mais simples. Usando a viscosidade dinâmica μ , a equação fica:

$$Re = \left(\frac{\rho v_m D_h}{\mu} \right) \quad (3-9)$$

3.4.6

Cálculo da Eficiência de Deslocamento

A fim de complementar a interpretação qualitativa das curvas experimentais de densidade em função do volume adimensional bombeado, foi desenvolvido um procedimento quantitativo para a estimativa da eficiência de deslocamento. O método baseia-se no cálculo da área entre a curva experimental e a curva ideal de deslocamento, conforme descrito a seguir.

Os cálculos foram realizados a partir dos dados de densidade obtidos experimentalmente pelo medidor de vazão mássica tipo Coriolis instalado na saída da seção de teste. Os valores registrados em função do tempo foram exportados e pós-tratados em planilhas do *Microsoft Excel*, onde foram aplicadas as normalizações e integrações necessárias para o cálculo da área entre as curvas.

A área adimensional entre as curvas foi determinada por:

$$A = \frac{\sum_i |y_i - y_{\text{ideal}}| \Delta V}{\Delta V_{\text{total}}^*} \quad (3-10)$$

em que y_i é a densidade adimensional calculada a partir das medições experimentais, e y_{ideal} representa a curva de deslocamento ideal, definida teoricamente.

O parâmetro y_i é obtido pela normalização das densidades medidas em função das densidades dos fluidos inicial (ρ_A) e final (ρ_C):

$$y_i = \frac{\rho_i - \rho_A}{\rho_C - \rho_A} \quad (3-11)$$

onde:

- ρ_A corresponde à densidade do primeiro fluido (fluido deslocado);
- ρ_C corresponde à densidade do terceiro fluido (fluido deslocador final).

Dessa forma, y_i varia no intervalo $[0, 1]$, em que $y_i = 0$ representa a presença exclusiva do fluido inicial e $y_i = 1$ indica o completo preenchimento da seção pelo fluido final.

A curva ideal y_{ideal} foi definida de modo a representar um deslocamento teórico perfeito, no qual não há mistura entre os fluidos e as interfaces avançam linearmente ao longo do tempo, de acordo com o volume adimensional bombeado V^* :

$$y_{\text{ideal}} = \begin{cases} 0, & V^* \leq V_1 \\ \beta, & V_1 < V^* \leq V_2 \\ 1, & V^* > V_2 \end{cases} \quad (3-12)$$

em que o termo β é dado por:

$$\beta = \frac{\rho - \rho_A}{\rho_C - \rho_A} \quad (3-13)$$

O valor de A quantifica o desvio entre o escoamento experimental e o comportamento ideal. A eficiência de deslocamento global (η) é então obtida a partir da complementaridade entre as áreas, sendo expressa como:

$$\eta = 1 - A \quad (3-14)$$

Assim, quanto menor a área entre as curvas, mais eficiente é o processo de deslocamento. Esse método permite comparar de forma direta o desempenho das diferentes condições de vazão, excentricidade e inclinação analisadas. Os resultados serão descritos na seção de resultados e discussões.

3.5 Matriz de teste experimental

Os experimentos realizados para avaliar o comportamento dos fluidos em condições de escoamento no espaço anular com zonas alargadas consideraram variáveis distintas, tais como excentricidades, vazões e inclinações. Tais experimentos foram investigados tanto para fluidos newtonianos como para fluidos não newtonianos, visando compreender os fatores que afetam a deslocamento de fluidos remanescentes espaço anular com erosão em operações de cimentação primária.

Os testes experimentais foram conduzidos com 3 diferentes vazões, o *STO* de 25%, 50% e 100% e inclinações de 0°, 30° e 60°. As inclinações são medidas

em relação à direção vertical, sendo 0° correspondente ao caso vertical e 60° ao caso de maior inclinação analisado.

4

Resultados

4.1

Caracterização de fluidos

Na presente seção, serão apresentados e discutidos os resultados das caracterizações dos fluidos de trabalho.

4.1.1

Densidades

A Tabela 4.1 apresenta a densidade dos três fluidos newtonianos (óleo, água e glicerina) usados nos experimentos que serão discutidos posteriormente.

Tabela 4.1: Densidades dos fluidos newtonianos

Fluidos	Densidade (kg/m ³)
Óleo de soja	920,93
Água	999,02
Glicerina	1257,98

A tabela 4.2 apresenta as densidades para os fluidos de perfuração e soluções aquosas com Carbopol®.

Tabela 4.2: Densidades dos fluidos não newtonianos

Fluidos	Densidade (kg/m ³)
10 ppg	1186,23
12 ppg	1423,22
16 ppg	1883,26
0,10% de Carbopol®	998,87
0,15% de Carbopol®	1151,23
0,20% de Carbopol®	1210,79

Os ensaios que foram conduzidos com Carbopol®, são empregados como fluidos modelo não newtonianos. A escolha desse material visou facilitar a visualização e a análise qualitativa dos padrões de escoamento, permitindo a correlação direta com os resultados obtidos nos gráficos de deslocamento. É importante destacar que a formulação adotada não teve como objetivo reproduzir exatamente as propriedades físico-químicas dos fluidos de perfuração, mas sim representar adequadamente seu comportamento reológico, a presença de tensão limite de escoamento.

4.1.2

Viscosidades dos fluidos newtonianos

A Tabela 4.3 apresenta as viscosidades dinâmicas da água, óleo e glicerina.

Tabela 4.3: Viscosidades dos fluidos newtonianos

Fluidos	Viscosidade (cP)
Óleo de soja	50,72
Água	1,00
Glicerina	917,90

4.1.3

Viscosidade de fluidos de perfuração através de Viscosímetro rotacional

Utilizando a metodologia do viscosímetro de bancada Fann 35A, os dados foram adquiridos através das rotações do equipamento, tendo também sido utilizados os valores de conversão presentes na API do mesmo [14]. Em seguida, foram calculadas as tensões e deformações para cada fluido em diferentes rotações. O gráfico 4.1 representa a curva de escoamento para cada fluido de perfuração.

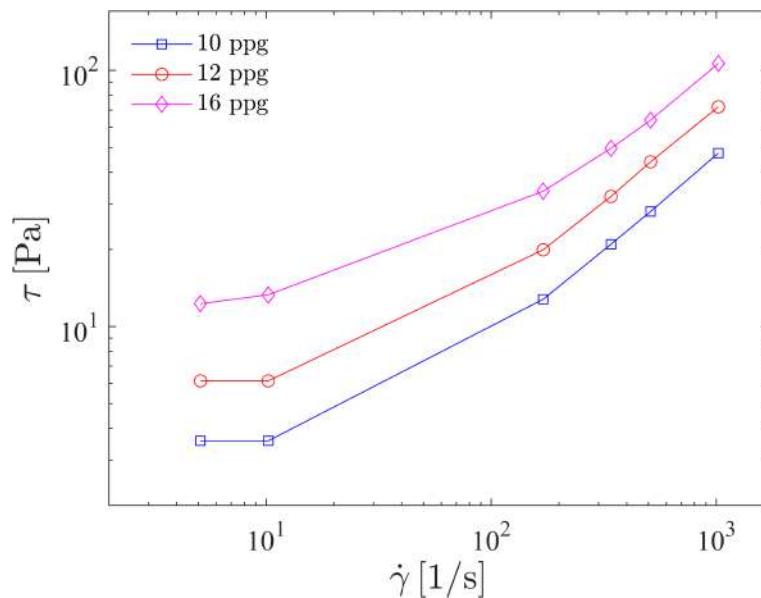


Figura 4.1: Curva de escoamento segundo viscosímetro Fann 35A

4.1.4

Reologia dos fluidos não newtonianos

4.1.4.1

Fluidos de perfuração

Nesta seção estão os testes reológicos realizados nos três fluidos de perfuração fornecidos pela Petrobras.

O gráfico do teste a taxa de cisalhamento constante de $0,01\text{ s}^{-1}$ é apresentado na Figura 4.2. Após 2 horas de teste, foi possível identificar o tempo de regime permanente de cada um dos fluidos. O fluido com 16 ppg atingiu o regime permanente antes dos outros dois. A partir de aproximadamente 1000 s não foram mais observadas mudanças significativas no valor da viscosidade. O segundo fluido a atingir o regime permanente mais rapidamente foi o fluido com 12 ppg no tempo de 2000 s. Em pouco mais de 3000 s o fluido com 10 ppg atingiu o regime permanente, ainda apresentando algumas instabilidades após este tempo. Estes tempos foram usados como dado de entrada no teste discutido a seguir.

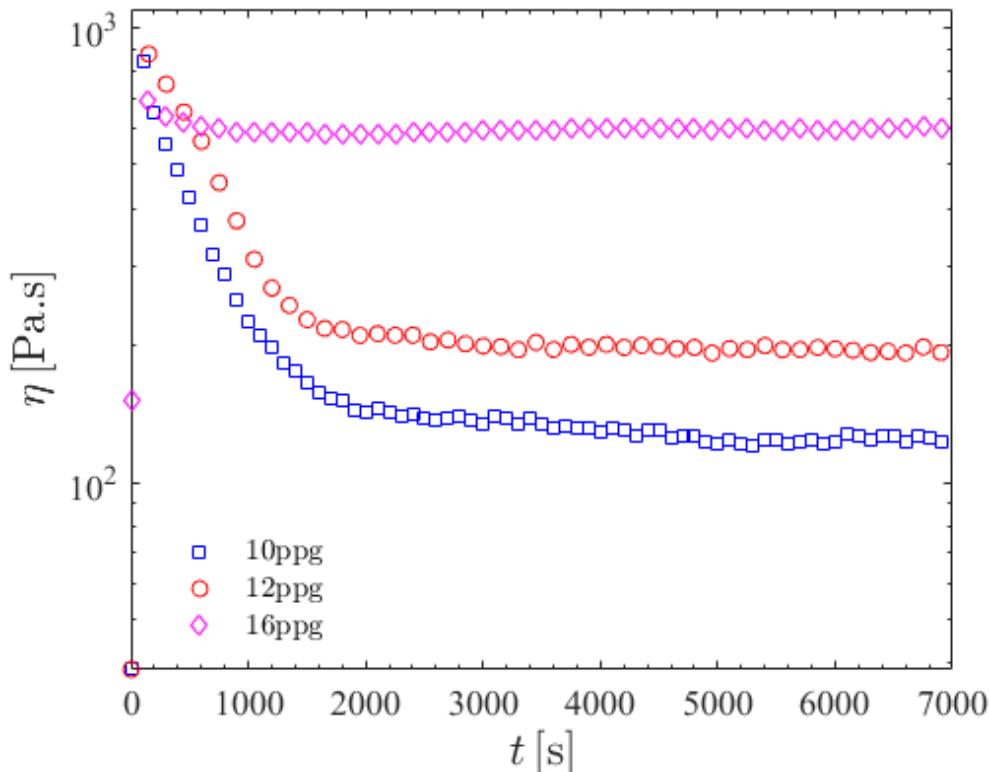


Figura 4.2: Teste a taxa de cisalhamento constante.

As curvas de escoamento, gráficos da tensão de cisalhamento e da viscosidade em função da taxa de cisalhamento, são mostradas nas Figuras

4.3 e 4.4, respectivamente. Observa-se que o fluido com 16 *ppg* apresentou maior tensão e viscosidade durante todo o teste. Os fluidos com 12 *ppg* e 10 *ppg* mostraram valores de tensão e viscosidade praticamente iguais nas menores taxas de cisalhamento ($0,1\text{ s}^{-1}$ até 10 s^{-1}). Entretanto, nas maiores taxas (10 s^{-1} até 1000 s^{-1}) o fluido com 12 *ppg* teve maiores valores de tensão e de viscosidade. A viscosidade dos fluidos foi ajustada ao modelo de Herschel–Bulkley (4-1) (Fig. 4.3) definido a seguir [53].

$$\begin{cases} \tau = \tau_y + K\dot{\gamma}^n, & \text{se } \tau > \tau_y \\ \dot{\gamma} = 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (4-1)$$

O fluido com 16 *ppg* apresentou $\tau_y = 7,33\text{ Pa}$, enquanto os fluidos de 10 *ppg* e 12 *ppg* apresentaram $\tau_y = 5,29\text{ Pa}$ e $\tau_y = 5,2\text{ Pa}$, respectivamente.

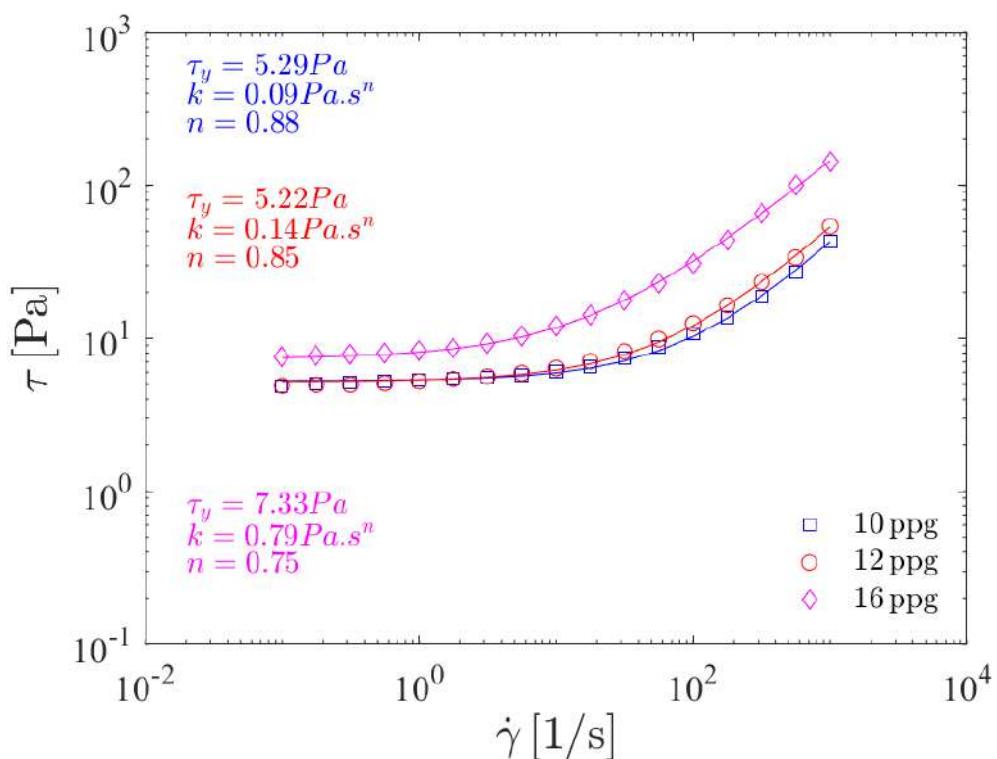


Figura 4.3: Curva de escoamento (tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento) dos três fluidos de perfuração.

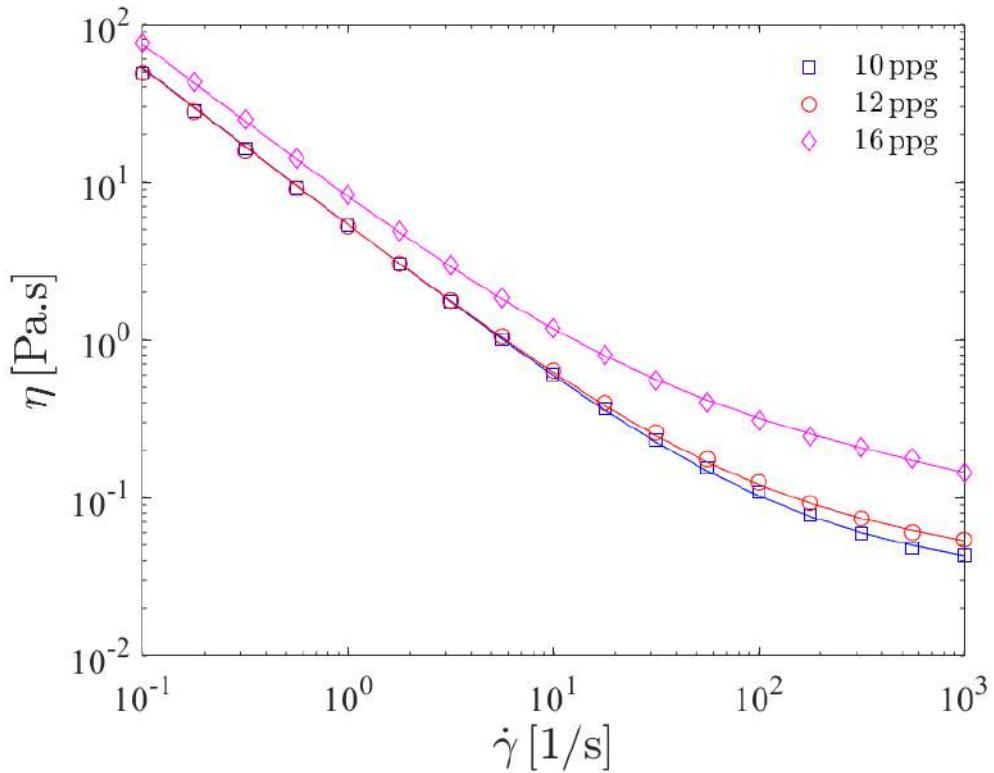


Figura 4.4: Curva de escoamento (viscosidade em função da taxa de cisalhamento) dos três fluidos de perfuração.

A Figura 4.5 apresenta o gráfico do teste oscilatório de varredura da amplitude de tensão. É observado, para todos os fluidos, que o G' (módulo de armazenamento ou módulo elástico) é maior do que G'' (módulo de perda ou módulo viscoso), e abaixo da tensão limite de escoamento são dominantes na região viscoelástica linear. Nota-se que a região viscoelástica está abaixo de 0,4 Pa para todos os fluidos. Logo, para o teste de varredura de tempo considerou-se $\tau_a = 0,01$ Pa.

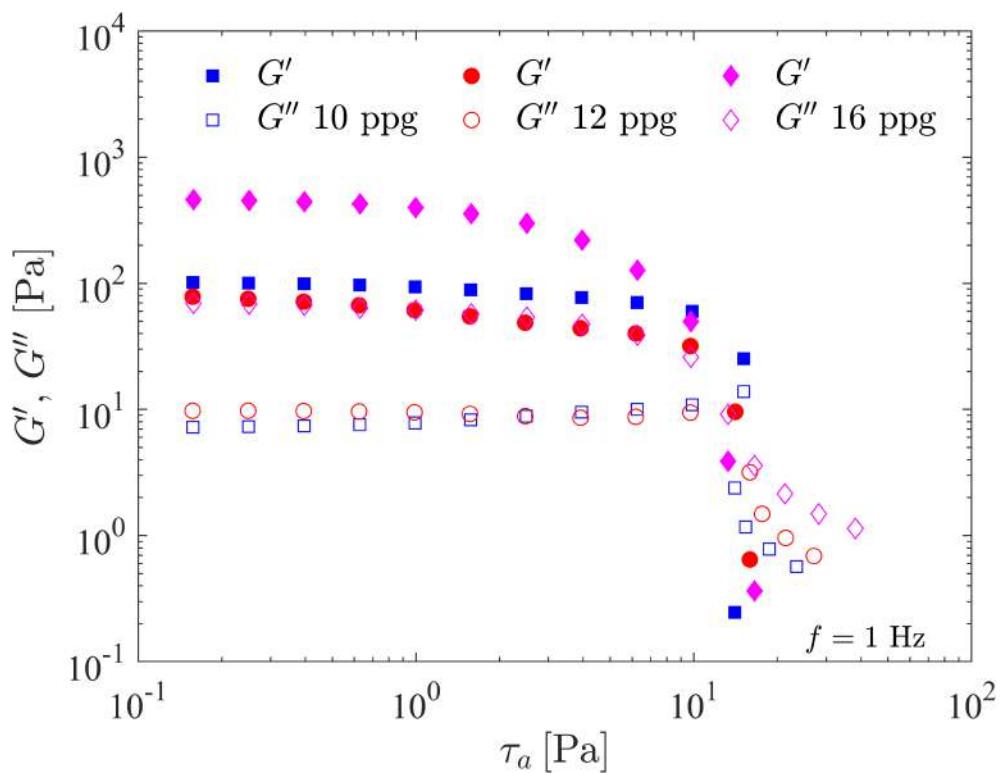


Figura 4.5: Teste de varredura da amplitude de tensão a 1Hz para os três fluidos de perfuração.

O gráfico do teste oscilatório de varredura de tempo é mostrado na Figura 4.6. Os dois módulos (G' e G'') foram observados durante quase 24 horas, a fim de identificar se houveram mudanças na microestrutura dos fluidos de perfuração ao longo do tempo. Os módulos dos fluidos não mantiveram-se constantes ao longo do experimento, indicando que estas amostras são instáveis durante o tempo do experimento.

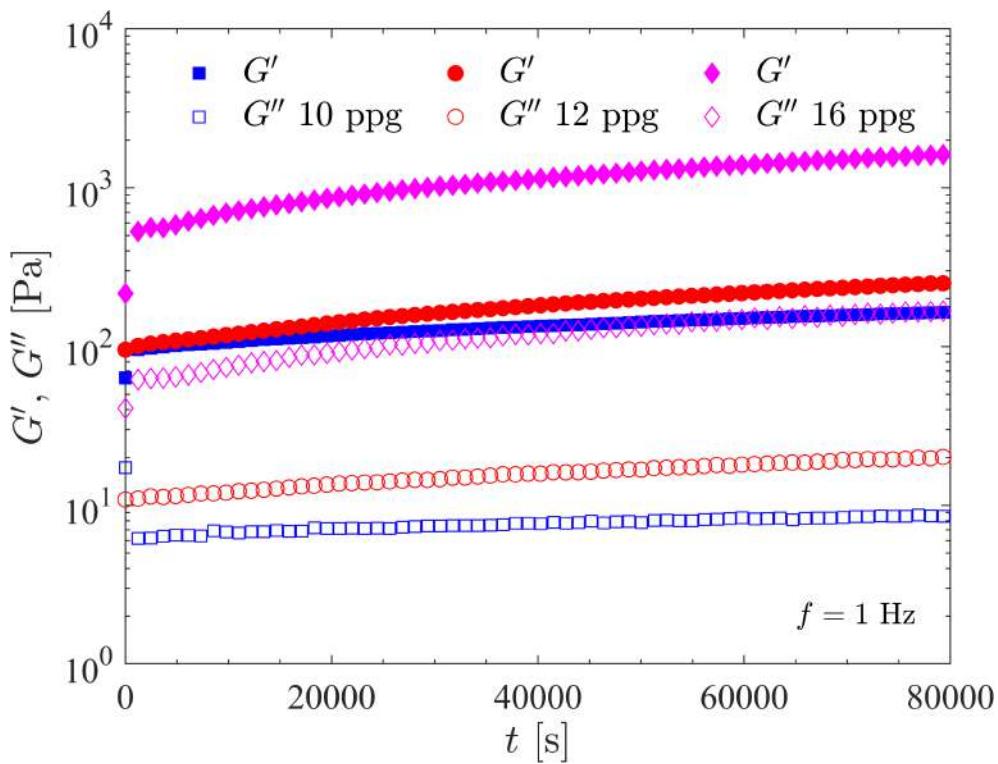


Figura 4.6: Teste oscilatório de varredura de tempo impondo $\tau_a = 0,01 \text{ Pa}$ e $f = 1 \text{ Hz}$.

4.1.4.2

Soluções aquosas de Carbopol

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam as curvas de escoamento das soluções aquosas de Carbopol investigadas. Os comportamentos observados são bem descrito pela função de viscosidade de Herschel-Bulkley (4-1).

Os valores dos parâmetros em questão foram obtidos por meio de ajustes de curva e apresentados para os três fluidos de base Carbopol. Constatou-se que todos os fluidos apresentam tensão limite de escoamento. Adicionalmente, foi observado que a tensão limite de escoamento aumenta com o aumento da concentração de Carbopol, em conformidade com as expectativas.

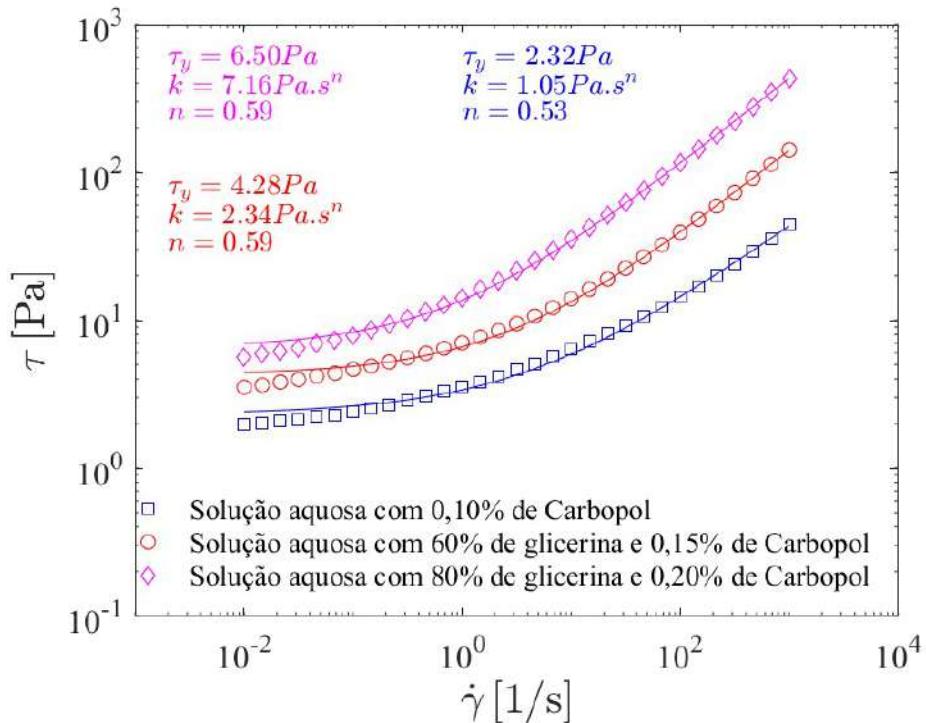


Figura 4.7: Curvas de escoamento: tensão como função da taxa de cisalhamento.

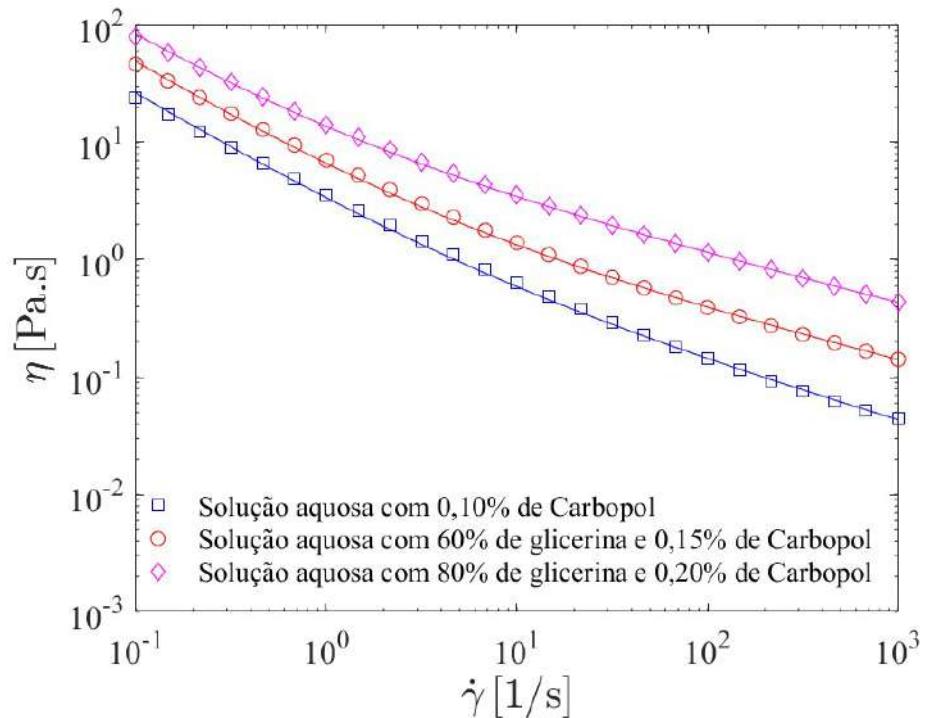


Figura 4.8: Curvas de escoamento: viscosidade em função da taxa de cisalhamento.

4.1.5

Teste da proveta

A Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam o teste da proveta para os fluidos com 10 ppg, 12 ppg e 16 ppg, respectivamente. Com este teste foi possível identificar o tempo de estabilidade das amostras. Essa informação é essencial para os testes na bancada experimental, visto que os fluidos ficam condicionados em condições estáticas dentro das garrafas de transferência.

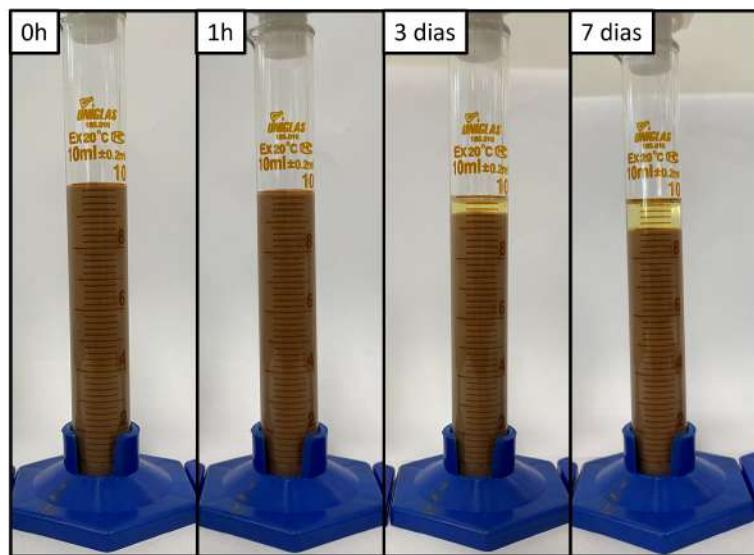


Figura 4.9: Teste da proveta do fluido com 10 ppg.

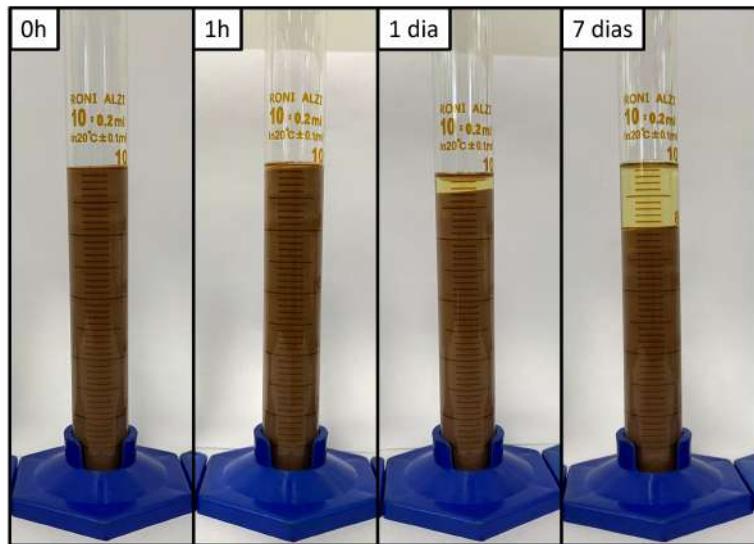


Figura 4.10: Teste da proveta do fluido com 12 ppg.

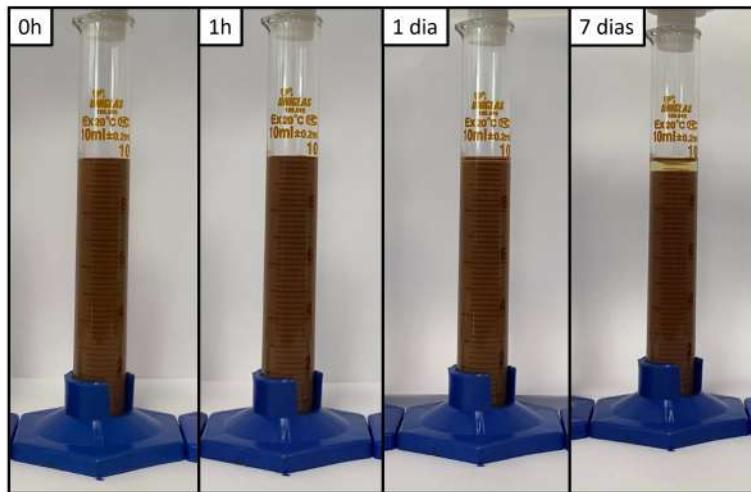


Figura 4.11: Teste da proveta do fluido com 16 ppg.

No geral, os três fluidos de perfuração mantiveram-se estáveis após 1 hora de experimento. Entretanto, após 1 dia de experimento, observou-se uma camada olefínica na parte superior das provetas dos fluidos com 10 *ppg* (Fig. 4.9) e 12 *ppg* (Fig. 4.10), indicando instabilidade das amostras. Após 7 dias, o fluido com 12 *ppg* demonstrou maior desestabilização do que os outros dois, no qual a camada olefínica apresentada foi de 2 *mL*. O fluido com 10*ppg* apresentou esta camada com aproximadamente 1 *mL*, sendo mais estável que o fluido anterior. O fluido de perfuração com 16 *ppg* (Fig. 4.11) foi o mais estável entre os três, apresentando a camada de olefínica com apenas 0,5 *mL*. Ainda que seja um ótimo teste visual quanto ao comportamento de separação de fases dos fluidos, este teste não é capaz de indicar quantitativamente a migração de partículas e sedimentação. Portanto, realizou-se teste no analisador de estabilidade, que será discutido na seção imediatamente abaixo.

4.1.6

Teste no avaliador de estabilidade

Nesta seção serão apresentados apenas os resultados para o fluido de perfuração com 12 *ppg*, visto que ele demonstrou ser o mais instável no teste da proveta. Os resultados para os fluidos com 10 *ppg* e 16 *ppg* são análogos aos discutidos a seguir.

O gráfico da variação do retroespalhamento (ΔBS) da luz incidida em função da altura do frasco e do tempo é apresentado na Figura 4.12. O lado esquerdo do gráfico representa a parte inferior do frasco, enquanto o lado direito representa a parte superior. Ao lado do gráfico está o gradiente de cores que representa a evolução temporal, sendo a cor azul escuro relativa ao início do teste e a cor vermelha é relativa ao final do teste.

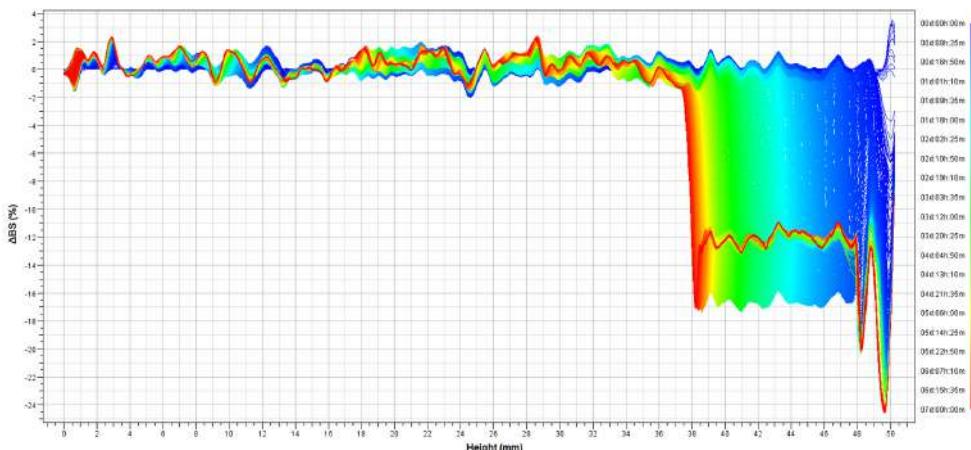


Figura 4.12: Gráfico da variação do retroespalhamento de luz, em função da altura do frasco da amostra, ao longo do tempo.

No lado direito do gráfico, que representa as alturas de 50 mm até 38 mm, o sinal de retroespalhamento diminuiu em média 17%, pois a concentração de partículas dispersoras de luz diminuiu na parte superior do frasco. Esse comportamento é um indício de sedimentação das partículas sólidas e/ou gotas do fluido. Entre a altura de 38 mm e 0 mm a variação do retroespalhamento não ultrapassou 2%, indicando que a concentração de partículas quase não variou do meio para o fundo do frasco. Em geral, quando ocorre o fenômeno de sedimentação, é observado o aumento no sinal de retroespalhamento no fundo do frasco (lado esquerdo), entretanto isto não ocorre para esta amostra. Possivelmente este comportamento se deve ao fato do fluido de perfuração ser muito concentrado, impossibilitando o equipamento de identificar a sedimentação com mais precisão.

O software do analisador de estabilidade cria automaticamente um vídeo correlacionando os dados adquiridos com um desenho do frasco usado durante o experimento. Na Figura 4.13 está um *print* deste vídeo com o desenho e uma foto do frasco real ao final do teste, que podem ser diretamente relacionadas. Com este artifício, observou-se que o processo da sedimentação do fluido com 12 ppg em condições estáticas começa a ocorrer em 11 horas.

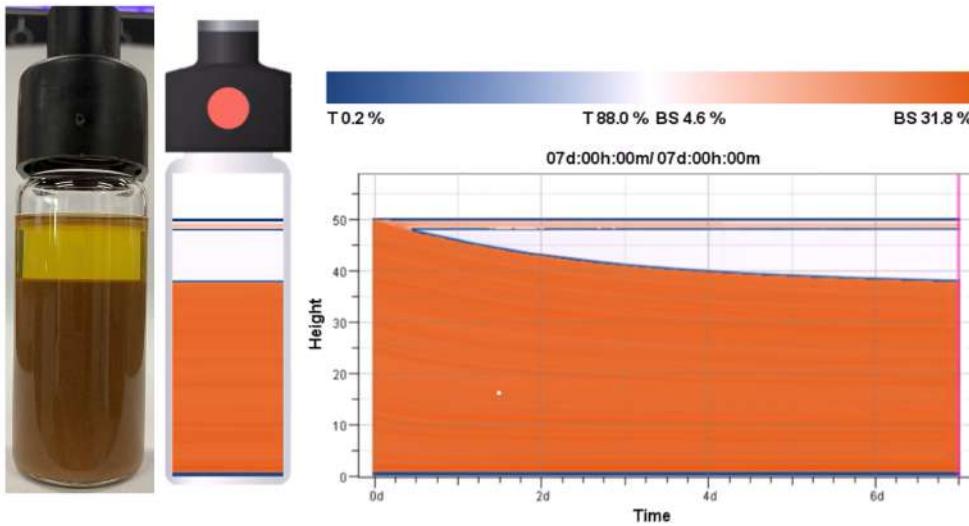


Figura 4.13: Frasco contendo fluido de perfuração com 12 ppg após 7 dias de teste.

Uma análise complementar é apresentada no gráfico da Figura 4.14, que mostra a variação na transmissão da luz incidida na amostra em função da altura do frasco e do tempo. No lado direito do gráfico (38 mm a 48 mm) o sinal de transmissão aumentou cerca de 85% com o tempo, visto que a luz conseguiu atravessar a amostra, devido à diminuição da concentração de partículas na parte superior do frasco. O lado esquerdo do gráfico não apresenta variação, pois a luz não conseguiu atravessar a amostra, logo não há transmissão. Isto ocorre em virtude da alta concentração de partículas entre 38 mm e 0 mm do frasco contendo a amostra.

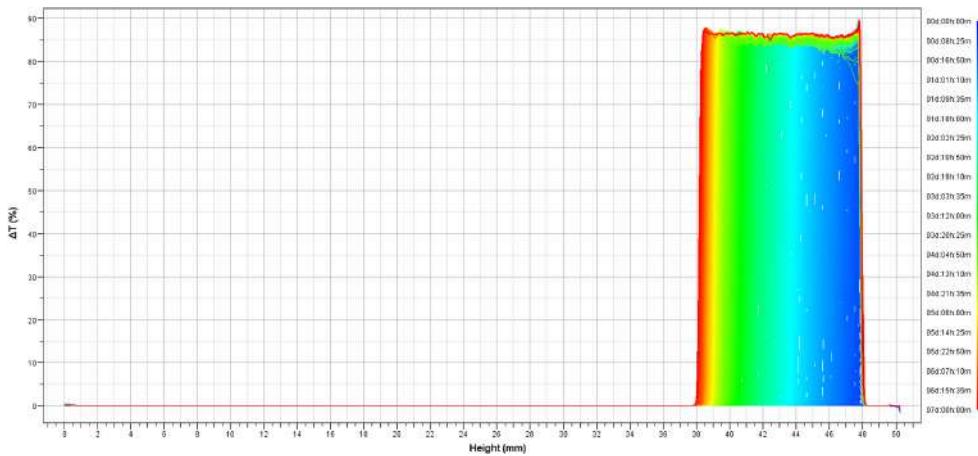


Figura 4.14: Gráfico da variação de transmissão de luz, em função da altura do frasco da amostra, ao longo do tempo.

Como os fluidos com 10 ppg e 16 ppg demonstraram maior estabilidade, o fluido limitante foi o de 12 ppg. Sendo assim, foi definido que o tempo máximo

que os fluidos poderiam permanecer dentro das garrafas de transferência para os experimentos na bancada seria de 11 horas.

4.2

Resultados Experimentais de Deslocamento

Todos os testes realizados apresentaram número de Reynolds ($Re < 1$) inferior a 1, indicando que os efeitos iniciais são desprezíveis. Dessa forma, adotou-se um regime de escoamento laminar em todos os casos analisados, o que justifica a aplicação de simplificações na interpretação dos resultados.

Além disso, é importante salientar que todas as discussões e resultados apresentados refletem fielmente as condições observadas na bancada experimental. Dessa forma, eventuais variações são esperadas caso haja mudanças no cenário ou nos parâmetros operacionais em relação àqueles estudados neste trabalho.

Visando a repetibilidade dos resultados foram realizados uma média de 480 testes experimentais, e eram realizados triplicatas para cada bateria de testes.

4.2.1

Caso newtoniano

Nesta seção, serão apresentados os resultados dos experimentos baseados no histórico de densidade de deslocamento, bem como discutidas as influências de cada parâmetro estudado.

4.2.1.1

Influência do STO(%)

A Figura 4.15 apresenta a evolução da densidade em relação ao volume bombeado adimensional, impondo a vazão média de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$. A curva de STO = 25% apresenta o caso denominado ideal, que corresponde a um deslocamento perfeito com 100% de eficiência de deslocamento.

Pequenas instabilidades nas curvas (queda da densidade) podem ser observadas, causadas pelo desprendimento de gotas de óleo das paredes da seção de testes durante a passagem da água e da glicerina. Como a glicerina possui viscosidade superior à do óleo e da água, não há formação de *viscous fingering* e a interface é plana, conforme ilustrado Fig.4.16. Nessa figura, também é possível observar a presença de gotas de óleo na interface. Outro aspecto relevante a ser destacado é o fator de molhabilidade. Observou-se que o óleo de soja apresenta maior afinidade com a superfície de acrílico em comparação aos demais fluidos testados, o que dificulta sua remoção completa da seção de

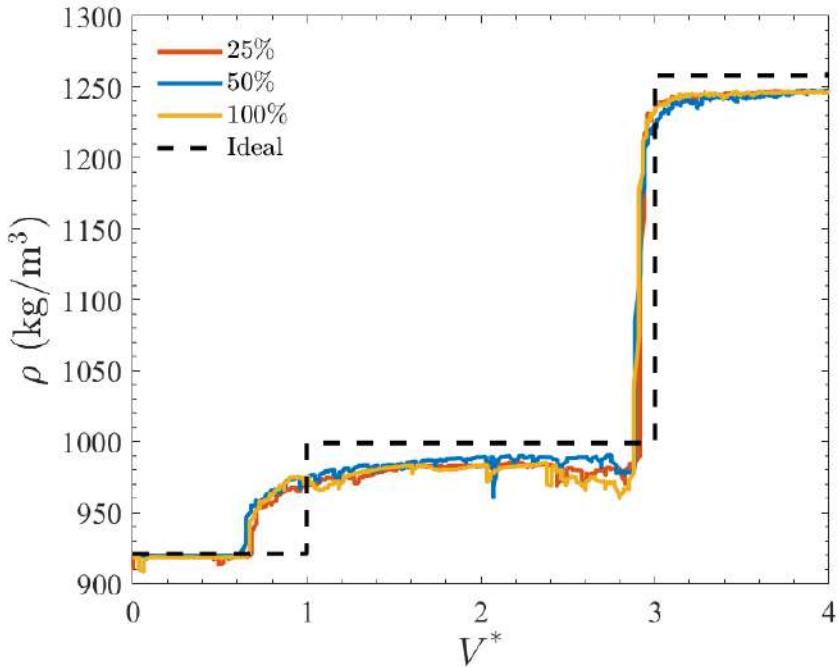


Figura 4.15: Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $2,2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$.

teste. Essa característica influencia diretamente a eficiência do deslocamento e deve ser considerada na interpretação dos resultados experimentais.

Durante o deslocamento do óleo pela água, observa-se que o comprimento da zona de mistura é similar para todas as excentricidades avaliadas, uma vez que as curvas de densidade permanecem praticamente sobrepostas até aproximadamente $V^* = 2$. Por outro lado, quando a glicerina é responsável por deslocar a mistura de água com óleo, nota-se uma leve variação no comportamento das curvas em função da excentricidade. No entanto, essa diferença é temporária, e as curvas voltam a se sobrepor logo em seguida, indicando a retomada de um regime de escoamento semelhante entre os casos.

Na segunda transição entre os patamares de densidade, observa-se que o caso com *standoff* de 50% se aproxima mais do comportamento ideal, indicando uma maior eficiência de deslocamento. Em contraste, a condição com excentricidade de 25% apresenta uma zona de mistura mais extensa, o que se justifica pelo desvio mais acentuado da coluna. No volume correspondente a $V^* \approx 2$, as curvas referentes aos casos com 100% e 50% de *standoff* exibem uma queda brusca de densidade, atribuída à abertura da válvula e consequente mudança do fluido injetado.

Logo após essa transição, são perceptíveis instabilidades em todas as curvas, associadas à entrada do terceiro fluido no escoamento. Na Figura 4.16, é



Figura 4.16: Bolhas de óleo na interface da água com a glicerina.

possível observar gotas residuais aderidas à parede do canal, que são gradualmente deslocadas pela glicerina (fluido azul). O desprendimento dessas gotas contribui para a formação das instabilidades localizadas, especialmente na região mencionada anteriormente.

Após o volume bombeado de aproximadamente $V^* \approx 2,8$, o sensor identifica a presença da glicerina no escoamento, momento a partir do qual todas as curvas passam a apresentar comportamentos bastante semelhantes, dificultando a distinção de diferenças significativas entre os casos analisados.

A Figura 4.17 apresenta de evolução temporal da densidade impondo a vazão média de $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.

Na primeira transição de densidade (óleo sendo deslocado pela água), os comprimentos da zona de mistura para as curvas com 25% e 50% de *standoff* apresentam-se semelhantes. Por outro lado, no caso concêntrico, observa-se que o aumento da densidade ocorre de forma ligeiramente mais lenta em comparação com os demais casos. Com isso, a curva referente a 100% de *standoff* inicia sua evolução abaixo das demais, mas, em seguida, todas as curvas passam a apresentar comportamentos semelhantes entre si, com comprimentos de mistura praticamente idênticos.

Apesar da tendência ao surgimento de instabilidades do tipo *fingering*

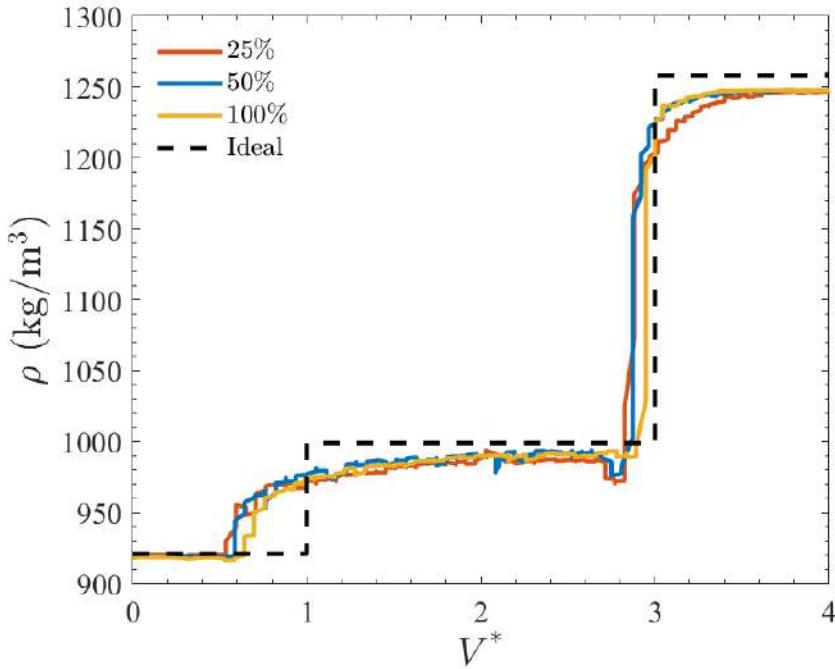


Figura 4.17: Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $4,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

nas maiores excentricidades (ver Figura 4.18), as curvas com 25% de *standoff* não evidenciam uma diferença clara que indique influência significativa da excentricidade sobre o comprimento da zona de mistura.

Na segunda etapa do teste, em que a glicerina é responsável por deslocar a mistura de água com óleo, observa-se, na Figura 4.17, uma hierarquia distinta no aumento da densidade em função do tempo, em comparação ao caso com menor vazão. Nota-se a presença de menores instabilidades durante a ascensão das curvas de densidade; no entanto, observa-se também uma maior quantidade de gotas de fluidos remanescentes aderidas à interface de deslocamento. Essas gotas formam um vale de densidade nas curvas referentes aos casos com 25% e 50% de *standoff*, indicando que, até esse volume bombeado, ainda há uma quantidade considerável de resíduos ao longo da seção de testes.

Durante a elevação da densidade, no momento em que o sensor começa a detectar a presença da glicerina, a curva correspondente ao caso concêntrico se mantém mais próxima do comportamento ideal de deslocamento, enquanto as demais curvas apresentam tendência de subida semelhante. Em $V^* \approx 3$, as curvas de 100% e 50% de *standoff* se encontram e seguem praticamente sobrepostas até o final do deslocamento. Já a curva referente a 25% de *standoff* exibe um comprimento de mistura maior, o que é atribuído à formação de um escoamento do tipo *fingering*, fenômeno já esperado em razão da maior



Figura 4.18: Formato da interface água-óleo do teste com excentricidade 25% a $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.

excentricidade.

No deslocamento mostrado na Figura 4.19, observa-se a mesma tendência apresentada nos gráficos anteriores, confirmando o comportamento de descolamento no caso do fluido newtoniano. Um ponto que chama atenção é a curva de 25%, que apresenta um comprimento de mistura mais pronunciado. Essa zona corresponde basicamente ao intervalo em que a curva evolui do primeiro patamar até atingir o segundo patamar de densidade do deslocamento, sendo o maior comprimento de mistura observado justamente nesta curva.

Para corroborar com as discussões experimentais foi calculado com as equações 3-10 e 3-14 a eficiência de deslocamento na saída do *Coriolis*, o que mostra na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.

STO (%)	Vazão (m^3/s)		
	$2,2 \times 10^{-6}$	$4,4 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
100	92,82%	94,23%	92,21%
50	93,26%	93,15%	92,08%
25	93,25%	92,61%	91,30%

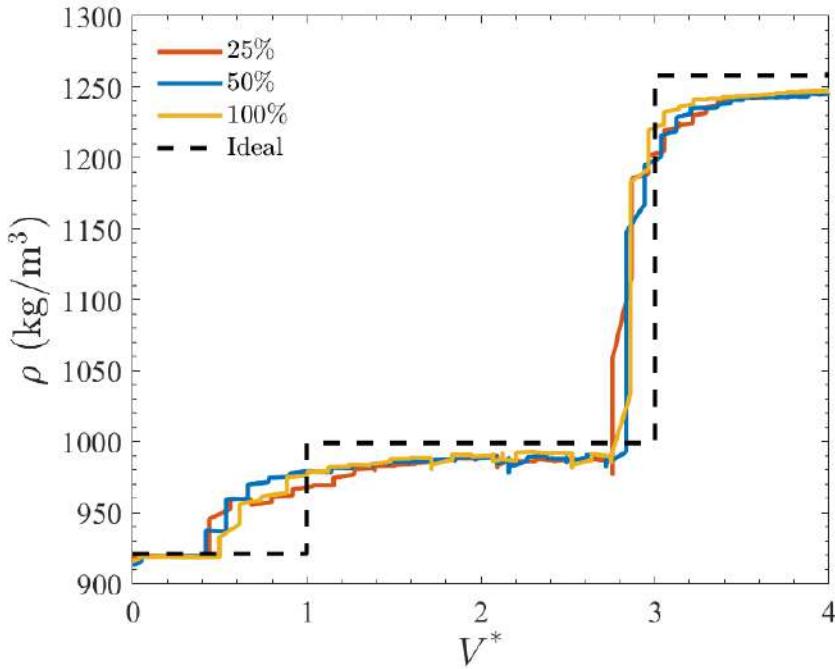


Figura 4.19: Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.

Os resultados mostram que a variação do *standoff* exerceu pouca influência sobre a eficiência de deslocamento em posição vertical, mantendo-se sempre acima de 91%. A leve redução observada com a diminuição do STO está associada à formação de zonas de recirculação próximas ao lado estreito do anular. Esses resultados são coerentes com o comportamento experimental, que indicou transições semelhantes entre as fases e um deslocamento eficiente, mesmo sob condições de excentricidade distintas.

4.2.1.2 Influência da Vazão

A Figura 4.20 apresenta a influência da vazão no deslocamento para o caso concêntrico. Observa-se que o comportamento qualitativo das curvas é semelhante entre si. Durante o deslocamento do óleo pela água, as curvas inicialmente se elevam de forma conjunta. No entanto, após o bombeamento de $V^* \approx 1$ volume, a curva correspondente à maior vazão apresenta uma elevação mais acentuada e com perfil mais estável do ponto de vista do deslocamento, sem quedas bruscas de densidade. Em contraste, a curva referente à menor vazão permanece abaixo da outra, apresentando diversas instabilidades. Após o volume adimensional de aproximadamente $V^* \approx 2,4$, essa curva evidencia uma queda significativa na densidade, o que indica um bom deslocamento dos

resíduos remanescentes na parede do canal.

Na transição para o terceiro patamar de densidade, as curvas mantêm comportamentos similares, formando um novo platô. Contudo, observa-se que, na menor vazão, o escoamento assume um caráter mais próximo do regime *plug* em comparação com o caso de maior vazão. É importante destacar que os dados experimentais demonstram uma sensibilidade significativamente maior às variações de vazão do que às variações de excentricidade, indicando que a vazão de injeção exerce papel mais significativo na dinâmica do deslocamento dos fluidos.

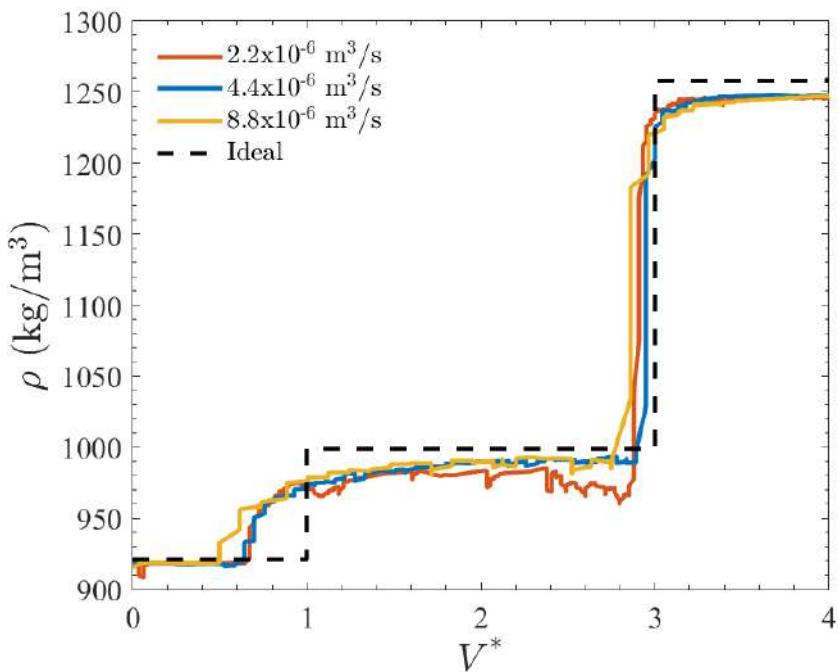


Figura 4.20: Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso concêntrico (*standoff* = 100%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.

A Figura 4.21 apresenta os resultados dos testes com *standoff* de 50%. Na primeira fase dos testes, observa-se que os comprimentos da zona de mistura são semelhantes entre as diferentes vazões, o que indica que, nessa etapa, a vazão não exerce influência significativa sobre a eficiência do deslocamento do óleo pela água.

Na segunda fase, ambas as curvas apresentam uma queda acentuada de densidade, atribuída ao acúmulo de fluidos anteriores na interface de deslocamento. A subida subsequente da densidade ocorre de forma bastante semelhante entre os dois casos, com destaque para a curva correspondente à menor vazão, que apresenta uma leve aproximação ao comportamento ideal de deslocamento.

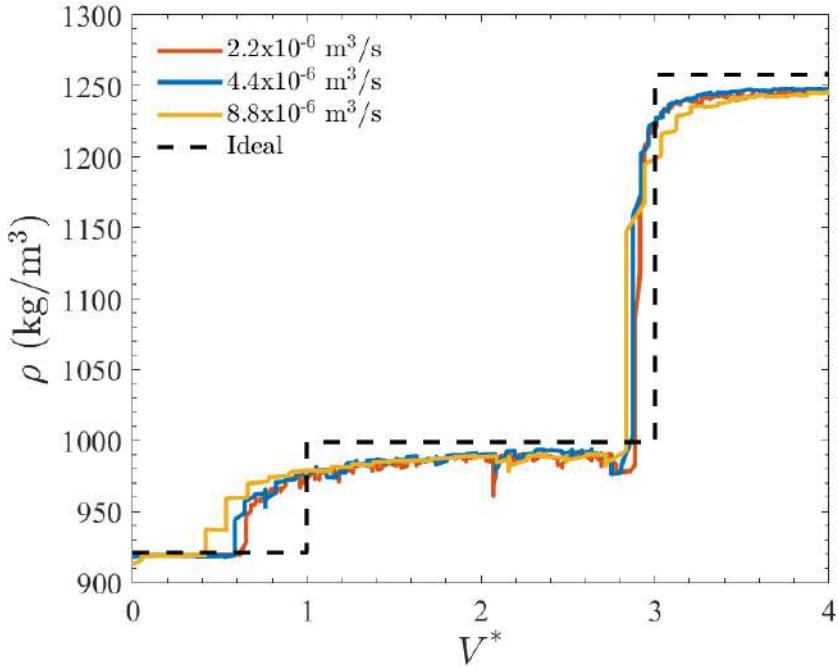


Figura 4.21: Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (*standoff* = 50%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $4,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

A Figura 4.22 apresenta os resultados dos testes com *standoff* de 25%. Na primeira fase dos testes, observam-se diferenças marcantes no deslocamento em função da vazão, evidenciando que essa excentricidade acentua a sensibilidade do escoamento à taxa de injeção. A curva correspondente à maior vazão apresenta uma elevação de densidade mais precoce do que a curva de menor vazão. Além disso, nota-se que o deslocamento promovido pela maior vazão apresenta maior interferência durante essa primeira transição de patamar, o que pode estar associado a uma interação mais intensa com os resíduos de fluido anterior.

Ao longo do deslocamento, as curvas mantêm comportamentos semelhantes até aproximadamente $V^* \approx 2,4$, quando a curva de menor vazão começa a exibir instabilidades, atribuídas ao desprendimento de gotas residuais de fluidos anteriores que permaneciam aderidas à parede do canal e que passam a ser deslocadas pela glicerina. Por outro lado, a curva de maior vazão apresenta uma queda abrupta de densidade em $V^* \approx 2,7$, seguida por uma rápida elevação, indicando a chegada efetiva do novo fluido.

Na segunda transição de densidade, as curvas seguem com comportamentos distintos. A curva de menor vazão apresenta uma subida mais aguda, característica de um deslocamento do tipo *plug*, o que se torna mais evidente na aproximação do último patamar. Já no caso da maior vazão, a curva sobe

com uma zona de mistura mais pronunciada, com acentuada transição em $V^* \approx 2,9$, resultando em um tempo ligeiramente maior para atingir o patamar de densidade final.

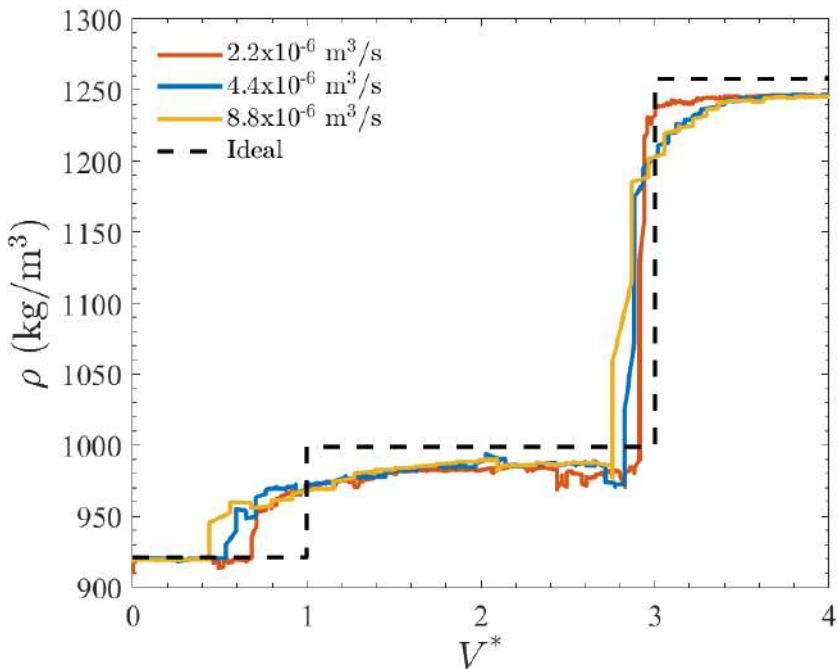


Figura 4.22: Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (standoff = 25%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.

Na Tabela 4.5 são apresentadas todas as eficiências, calculadas com base nas mesmas equações e princípios utilizados no caso anterior.

Tabela 4.5: Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.

Vazão (m^3/s)	STO (%)		
	100	50	25
$2,2 \times 10^{-6}$	92,82%	93,26%	93,25%
$4,4 \times 10^{-6}$	94,23%	93,15%	92,61%
$8,8 \times 10^{-6}$	92,21%	92,08%	91,30%

O aumento da vazão favoreceu a transição entre as fases, mas não resultou em ganhos expressivos na eficiência final, que permaneceu praticamente constante. A leve diferença entre as vazões analisadas confirma que, nas condições do escoamento na bancada experimental e para fluidos newtonianos, a razão viscosidade/densidade é o principal fator que governa o processo de substituição. Esse comportamento está de acordo com o observado experimen-

talmente, onde o aumento da vazão alterou o tempo de transição, mas não a eficiência observada e calculada.

4.2.1.3 Influência da Inclinação

Após os testes em posição vertical, novos experimentos foram realizados com a bancada inclinada a 30° e 60° , de modo a avaliar os efeitos gravitacionais e a influência da inclinação no deslocamento dos fluidos. Nessas condições, acrescentou-se a vazão de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$, ampliando a faixa de operação e permitindo investigar o impacto da taxa de injeção na eficiência do escoamento.

Os gráficos apresentados nas Figuras 4.23 e 4.24 foram construídos de maneira distinta dos demais, com o objetivo de aprimorar a comparação entre os casos analisados. No eixo y , os valores foram normalizados, de modo a fornecer uma representação qualitativa dos resultados obtidos a partir das simulações matemáticas.

A Figura 4.23 apresenta os resultados referentes à inclinação de 30° . Observa-se que tanto a vazão quanto a excentricidade desempenham papéis decisivos na eficiência de deslocamento, afetando o comprimento de mistura, a proximidade em relação ao perfil ideal e a quantidade de fluido residual ao longo dos ensaios.

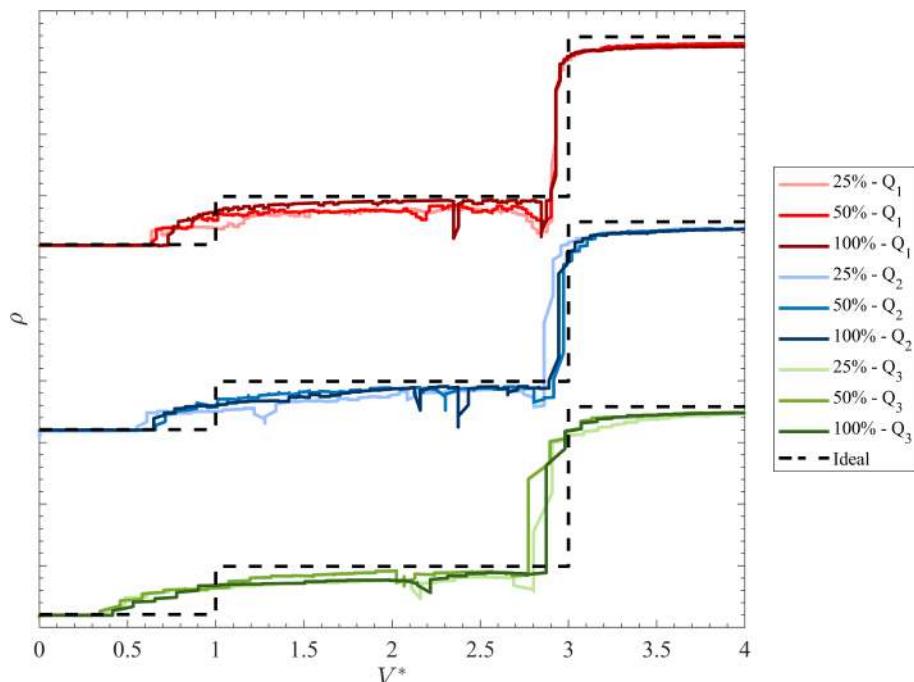


Figura 4.23: Evolução da densidade em função do volume bombeado adimensional com a bancada inclinada a 30° considerando $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO; para $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO.

Nos testes de menor vazão (curvas vermelhas), o deslocamento mostrou-se menos eficiente: as curvas apresentam patamares abaixo da densidade de referência, indicando maior retenção de óleo e prolongamento da zona de mistura. O aumento da excentricidade intensificou esse efeito, pois a geometria inclinada favorece caminhos preferenciais e o acúmulo de fluido nas regiões estreitas do anular.

Com a vazão intermediária (curvas azuis), nota-se uma melhora na eficiência de deslocamento, uma vez que as curvas se aproximam mais do perfil ideal e a dispersão da interface é reduzida. Ainda assim, a ocorrência de quedas pontuais de densidade, associadas ao desprendimento de gotas de óleo, evidencia que a excentricidade continua a limitar a eficiência, especialmente no caso de $STO = 25\%$.

Na maior vazão (curvas verdes), verifica-se o melhor desempenho global. As curvas convergem mais rapidamente para o patamar ideal e a eficiência de deslocamento é ampliada, mesmo em condições excêntricas. Contudo, a maior vazão também gera um aumento do comprimento de mistura, o que sugere um compromisso entre a rapidez na substituição e a intensificação da dispersão longitudinal.

De forma geral, os resultados com a bancada a 30° mostram que as vazões mais altas aumentam a eficiência de deslocamento, reduzindo o tempo necessário para atingir o perfil de substituição, maiores excentricidades comprometem a eficiência, favorecendo a retenção de óleo nas regiões mais estreitas e a interação entre vazão e excentricidade modula a formação de *ingers* e de gotas remanescentes, fenômenos que se refletem diretamente no desempenho do deslocamento.

Nas tabelas estão representadas as eficiências de deslocamento, considerando a influência do *Standoff* (Tabela 4.6) e da vazão (Tabela 4.7) para uma inclinação de 30° .

Na Tabela 4.6, observa-se que o aumento do STO não provoca variações significativas na eficiência de deslocamento, especialmente para vazões mais baixas. As eficiências permanecem próximas de 93–94%, indicando que a excentricidade exerce impacto relativamente pequeno nesse cenário. Destaca-se que, para o STO de 50%, a eficiência máxima de 94,86% é obtida com a vazão intermediária $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$, indicando que há uma relação equilibrada entre a excentricidade e a vazão que favorece o deslocamento mais eficaz.

Observa-se na Tabela 4.7 que a vazão intermediária ($4,4 \times 10^{-6} m^3/s$) tende a apresentar os melhores resultados em termos de eficiência para os STO de 50% e 100%, enquanto a vazão mais alta ($8,8 \times 10^{-6} m^3/s$) reduz ligeiramente a eficiência em todos os casos, especialmente para o STO de

Tabela 4.6: Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 30° .

STO (%)	Vazão (m^3/s)		
	$2,2 \times 10^{-6}$	$4,4 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
100	93,85%	93,65%	93,54%
50	93,67%	94,86%	91,17%
25	93,60%	92,08%	92,32%

50%. Esse comportamento sugere que em vazões mais elevadas podem induzir instabilidades ou aumento de mistura turbulenta local, comprometendo o deslocamento completo do fluido inicial.

Tabela 4.7: Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 30° .

Vazão (m^3/s)	STO (%)		
	100	50	25
$2,2 \times 10^{-6}$	93,85%	93,57%	93,60%
$4,4 \times 10^{-6}$	94,86%	94,86%	92,08%
$8,8 \times 10^{-6}$	93,54%	91,17%	92,32%

A análise evidencia que existe uma condição intermediária de STO e vazão que maximiza a eficiência, alinhando-se com os padrões observados em escoamentos não newtonianos e newtonianos em dutos inclinados, conforme relatado em estudos anteriores [10].

A Figura 4.24 apresenta os resultados obtidos para a bancada inclinada a 60° , seguindo a mesma lógica de análise adotada no caso de 30° . Nota-se que a inclinação mais acentuada intensifica a influência da gravidade e amplia as diferenças de comportamento entre as condições de excentricidade e vazão, afetando diretamente a eficiência de deslocamento.

Ao analisar inicialmente as curvas da menor vazão (curvas vermelhas), observa-se que todas apresentam, na primeira fase, tendência de aumento da densidade, ainda que de forma gradual. As curvas referentes a $STO = 25\%$ e $STO = 50\%$ iniciam esse crescimento antes do caso concêntrico, evidenciando zonas de mistura específicas e maior sensibilidade às condições geométricas. Na segunda fase, destacam-se instabilidades na curva de $STO = 50\%$, reflexo da dificuldade em remover o óleo da região excêntrica do anular. Esse comportamento reduz a eficiência de deslocamento, uma vez que parte do óleo é progressivamente retida ao longo do canal. Após a ativação da válvula e a entrada da glicerina, todas as curvas apresentam queda abrupta de densidade. Essa queda é mais acentuada em $STO = 25\%$, associada ao acúmulo de fluido remanescente na região estreita do anular. Apesar disso, a

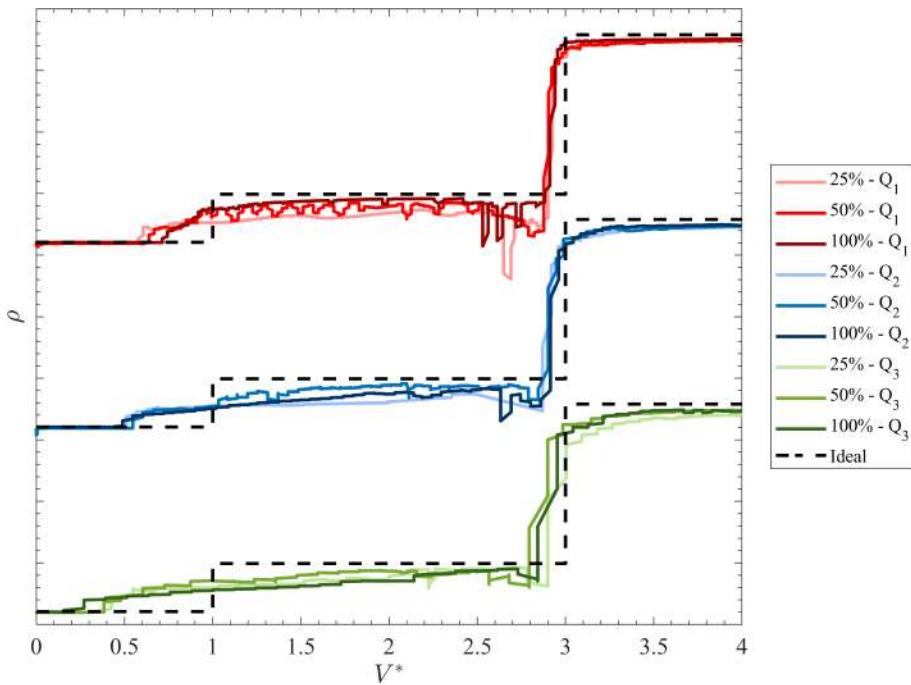


Figura 4.24: Evolução da densidade em função do volume bombeado adimensional com a bancada inclinada a 60° considerando $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO; para $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$ com 100%, 50% e 25% de STO.

curva de $STO = 100\%$ recupera-se de forma mais consistente, reforçando a maior eficiência de deslocamento no caso concêntrico.

Na vazão intermediária (curvas azuis), a primeira fase apresenta curvas próximas entre si até $V^* = 1$, evidenciando menor influência inicial da excentricidade. Na segunda fase, entretanto, a curva de $STO = 50\%$ destaca-se pela maior aproximação da curva ideal, sugerindo um deslocamento mais eficiente. Após a mudança de válvula, a curva de $STO = 100\%$ mostra oscilações características da ação da gravidade em condições inclinadas, mas recupera-se com rapidez, enquanto $STO = 50\%$ apresenta atraso mais pronunciado. Esse comportamento aparentemente contraditório frente ao observado a 30° se explica pela maior inclinação, que potencializa os efeitos gravitacionais e acentua as diferenças entre excentricidades, como ilustrado na Figura 4.25. Ao final da terceira fase, todas as curvas convergem para o patamar próximo ao ideal, confirmando que, apesar das instabilidades, o deslocamento atinge eficiência satisfatória.

Nos ensaios com a maior vazão (curvas verdes), o aumento da injeção favorece um deslocamento mais agressivo. As curvas iniciam próximas e convergem em $V^* \approx 0,5$, seguindo em conjunto até o início da subida para o terceiro patamar. Durante a transição, a curva de $STO = 50\%$ evidencia maior eficiência de deslocamento, acompanhada de perto pela de $STO =$

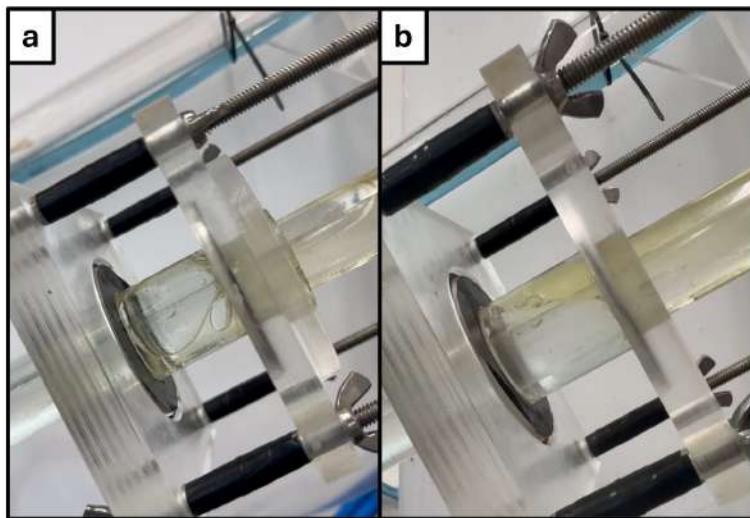


Figura 4.25: Interface do deslocamento do óleo pela água, na inclinação de 60° e vazão intermediária de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$, com excentricidade de a) 25% e de b) 50%.

100%, enquanto $STO = 25\%$ apresenta atraso significativo. Esse resultado sugere que, mesmo em geometrias excêntricas, o aumento da vazão pode mitigar parcialmente os efeitos negativos da inclinação, embora não elimine o aprisionamento característico em regiões estreitas.

De forma geral, os resultados da Figura 4.24 demonstram que a inclinação de 60° reduz a eficiência de deslocamento em comparação com 30° , sobretudo em excentricidades maiores e baixas vazões. A maior vazão atua como fator de estabilização, promovendo frentes de escoamento mais estáveis, mas com alongamento do comprimento de mistura. Essas observações reforçam que a eficiência de deslocamento é fortemente condicionada pela interação entre os fatores estudados.

Agora analisando de uma forma quantitativa, as tabelas estão representadas as eficiências de deslocamento, considerando a influência do *Standoff* (Tabela 4.8) e da vazão (Tabela 4.9) para uma inclinação de 60° .

Observa-se, na Tabela 4.8, que o aumento do STO provoca pequenas variações na eficiência de deslocamento, porém com um efeito levemente mais perceptível em relação ao caso de 30° . Para a vazão $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$, a eficiência máxima de 93,97% é alcançada com STO de 100%, enquanto valores intermediários de STO apresentam eficiência ligeiramente menor. Esse comportamento indica que, com o aumento da inclinação, a excentricidade exerce um efeito um pouco mais relevante, possivelmente devido à ação da gravidade favorecendo o avanço do fluido de deslocamento em ângulos maiores.

Na Tabela 4.9, nota-se que a vazão intermediária ($4,4 \times 10^{-6} m^3/s$) mantém uma eficiência elevada para STO de 50% e 100%, enquanto a vazão

Tabela 4.8: Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 60° .

STO (%)	Vazão (m^3/s)		
	$2,2 \times 10^{-6}$	$4,4 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
100	93,97%	93,61%	92,03%
50	92,98%	93,50%	92,61%
25	93,04%	92,42%	92,34%

mais alta ($8,8 \times 10^{-6} m^3/s$) tende a reduzir a eficiência, especialmente para o STO máximo. Isso sugere que, mesmo em inclinações maiores, vazões mais altas podem induzir mistura prematura ou instabilidades na seção de teste, comprometendo o deslocamento completo.

Tabela 4.9: Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 60° .

Vazão (m^3/s)	STO (%)		
	100	50	25
$2,2 \times 10^{-6}$	93,97%	92,98%	93,04%
$4,4 \times 10^{-6}$	93,61%	93,50%	92,42%
$8,8 \times 10^{-6}$	92,03%	92,61%	92,37

De maneira consistente com os resultados anteriores, observa-se que de fato existe uma relação balanceada entre STO e vazão que favorece o deslocamento mais eficiente. Em ângulos de 60° , a combinação de STO maior com vazão intermediária permite que o fluido avance de forma mais uniforme, minimizando a mistura e garantindo a remoção mais eficiente do fluido residual. Por outro lado, STO menor ou vazões elevadas podem resultar em retenção maior, ainda que as variações sejam relativamente pequenas, indicando que o processo de deslocamento ainda continua sendo eficaz menos em pequenas alterações de condições operacionais.

4.2.2

Cenários com fluidos de perfuração

Nesta seção serão discutidos os resultados dos experimentos feitos na bancada com os fluidos de perfuração.

4.2.2.1

Influência do STO(%)

Na primeira fase do deslocamento, ilustrada na Figura 4.26, é notório que o caso mais excêntrico ($STO = 25\%$) apresenta uma subida de densidade antecipada, enquanto as outras duas curvas ($STO = 50\%$ e $STO = 100\%$)

iniciam essa elevação no mesmo volume. Esse comportamento era esperado, uma vez que a maior excentricidade cria um caminho preferencial de menor resistência ao escoamento para o caso com $STO = 25\%$.

Durante a transição de patamar, as curvas de $STO = 25\%$ e $STO = 100\%$ exibem comportamentos semelhantes, diferenciando-se apenas por uma defasagem em volume. Já a curva referente a $STO = 50\%$ apresenta um comprimento de mistura mais acentuado, indicando um escoamento mais difuso nesta etapa. Na segunda fase do escoamento, todas as curvas apresentam crescimento contínuo de densidade, mantendo-se próximas entre si, sem que nenhuma delas se aproxime significativamente do perfil de deslocamento ideal.

Após a injeção do fluido de 16 ppg terceiro fluido, a curva de $STO = 25\%$ exibe um ruído no intervalo $2,5 < V^* < 2,8$, caracterizado por uma pequena elevação de densidade seguida de uma queda abrupta. Esse fenômeno pode ser atribuído ao acúmulo de fluidos remanescentes retidos nas cavidades e nas regiões mais confinadas do anular, consequência direta da excentricidade elevada. Observa-se também que esse pico ocorre simultaneamente à subida da curva correspondente ao $STO = 100\%$. Caso não houvesse fluido confinado na geometria, o escoamento seguiria por um caminho livre, comparável ao do caso concêntrico.

Ao analisar a transição para o terceiro patamar de densidade, observa-se que as curvas de $STO = 25\%$ e $STO = 50\%$ apresentam comportamentos semelhantes, mas com capacidade de deslocamento ligeiramente inferior à curva de $STO = 100\%$. Ainda assim, ambas se aproximam do terceiro patamar de densidade de forma satisfatória, atingindo valores muito próximos da curva ideal.

Ao variar a vazão, observa-se um comportamento mais estável do escoamento, com aumento no comprimento da zona de mistura em ambas as transições de patamar, conforme ilustrado na Figura 4.27. Na primeira fase do escoamento, as curvas apresentam elevações de densidade em volumes bastante próximos, com transições semelhantes tanto em comportamento quanto em proximidade relativa. A curva referente ao caso com $STO = 25\%$ tende a se manter acima das demais, devido ao caminho preferencial gerado pela maior excentricidade. Por outro lado, as curvas dos casos com $STO = 50\%$ e $STO = 100\%$ apresentam um comprimento de mistura ligeiramente maior.

No segundo patamar de densidade, as curvas mantêm-se muito próximas entre si, aproximando-se também da curva ideal de escoamento. Em seguida, nota-se a presença de ruídos na curva de $STO = 25\%$, ainda que com menor intensidade em comparação ao caso com menor vazão. Esses ruídos ocorrem no mesmo intervalo de V^* e podem ser atribuídos, como anteriormente discutido,

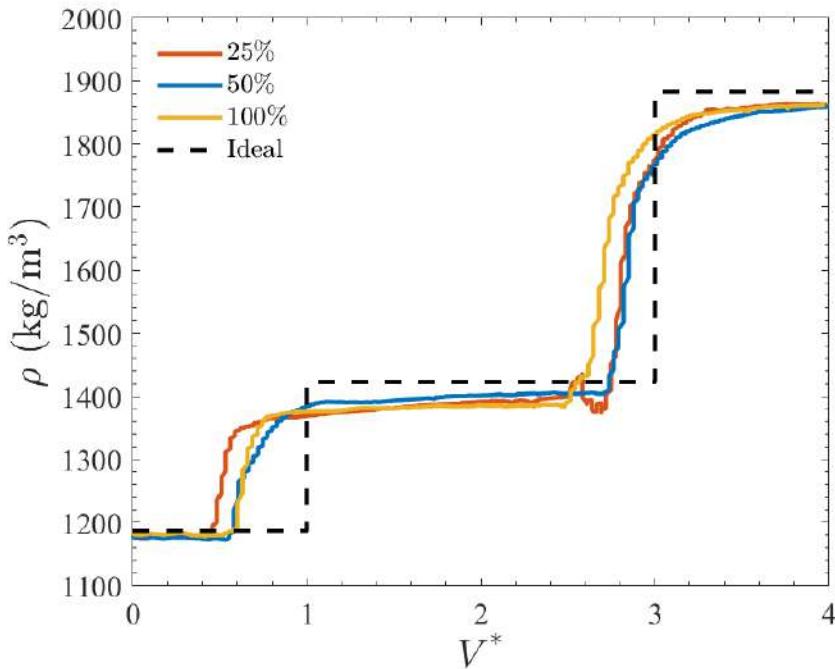


Figura 4.26: Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$.

à liberação de fluidos remanescentes presos nas regiões confinadas da geometria anular.

A segunda transição de patamar segue a mesma tendência da primeira, evidenciando que a curva de $STO = 100\%$ apresenta maior capacidade de deslocamento em relação às demais. Ao final do escoamento, todas as curvas convergem para valores muito próximos da curva ideal, indicando boa eficiência global do processo, especialmente em condições de maior vazão.

A Figura 4.28 evidencia a proximidade entre as três curvas, refletindo a tendência esperada dos resultados para essa condição de operação. A curva de densidade correspondente a $STO = 25\%$ encontra-se ligeiramente deslocada em relação às demais, mas todas as curvas convergem, apresentando um aumento sutil no comprimento da zona de mistura.

No segundo patamar de densidade, as curvas permanecem extremamente próximas entre si e mais alinhadas à curva ideal de escoamento, indicando maior uniformidade no deslocamento. No início da transição para o terceiro patamar, a curva de $STO = 25\%$ não apresenta os ruídos anteriormente observados em condições de menor vazão, e todas as curvas elevam-se de forma conjunta, resultando em um comprimento de mistura ainda mais acentuado.

Embora o terceiro patamar de densidade seja estabelecido, observa-se que o platô final apresenta um nível significativamente inferior em comparação com

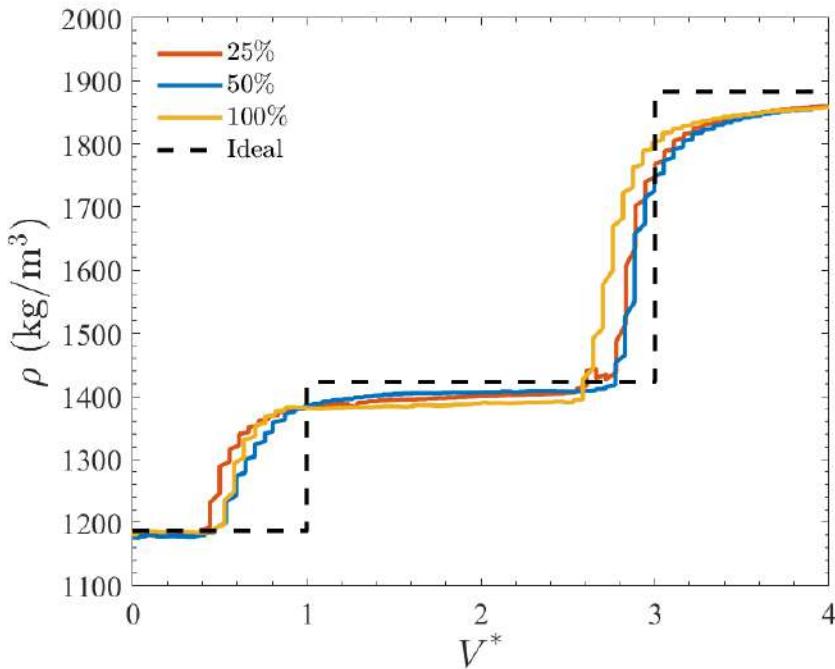


Figura 4.27: Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$.

os casos anteriores, possivelmente em decorrência de uma menor quantidade de fluido efetivamente deslocado na fase final do escoamento.

Portanto, pode-se afirmar que o comportamento do escoamento em função do aumento da vazão favorece o deslocamento do fluido. À medida que a vazão aumenta, observa-se que as curvas de $STO = 50\%$ e $STO = 100\%$ tendem a se aproximar da curva de $STO = 25\%$, especialmente na primeira transição de patamar. No segundo patamar de densidade, as curvas passam a apresentar comportamentos ainda mais semelhantes entre si e se aproximam progressivamente da curva ideal de escoamento à medida que a vazão aumenta, além de revelarem um crescimento nas zonas de mistura.

Outro aspecto relevante está relacionado à formação do terceiro patamar de densidade. Observa-se que, quanto maior a vazão, mais precocemente esse patamar é estabelecido, o que indica que uma maior quantidade de fluido residual foi eficientemente removida nos estágios anteriores. No entanto, esse comportamento também implica que, em vazões mais elevadas, o escoamento exige um tempo ligeiramente maior para atingir o completo deslocamento dos fluidos acumulados ao longo da seção de testes.

Na Tabela 4.10, observa-se o comportamento do fluido de perfuração sob a influência do *Standoff*. De modo geral, as eficiências de deslocamento se mantêm em torno de 90 a 94%, indicando que, mesmo em diferentes condições,

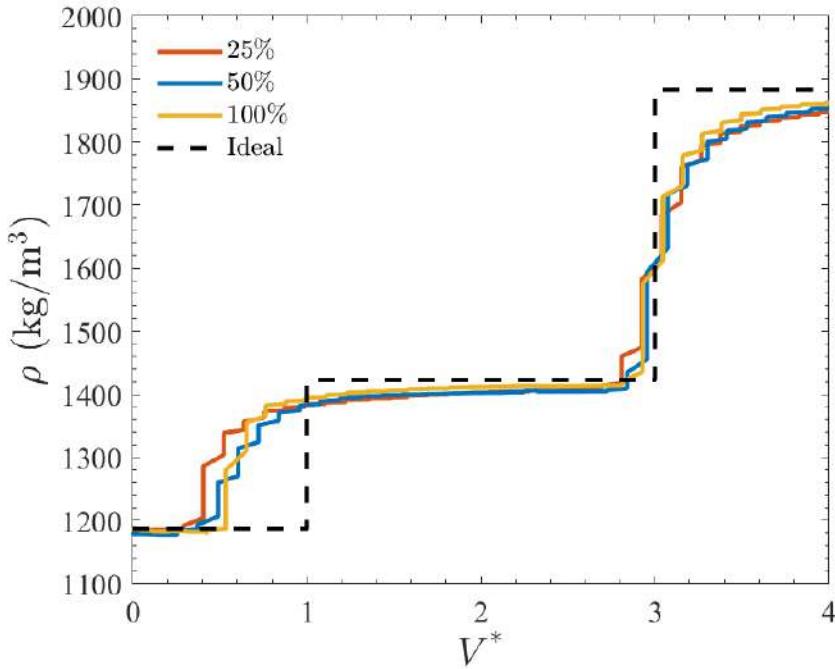


Figura 4.28: Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 25%, 50% e 100% de STO, para a vazão média de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.

o sistema apresenta um bom desempenho no deslocamento do fluidos.

Analizando a influência do *Standoff*, nota-se que as variações de eficiência são pequenas, o que mostra que, na posição vertical, o efeito geométrico exerce menor impacto sobre o escoamento. Ainda assim, é possível observar que para a vazão de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$ a eficiência aumenta com o *Standoff*, alcançando 93,96% para 100%. Esse comportamento indica que, para maiores vazões, a presença de um *Standoff* elevado ajuda a promover um deslocamento mais estável, reduzindo a retenção do fluido de perfuração nas regiões próximas às paredes.

Tabela 4.10: Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.

STO (%)	Vazão (m^3/s)		
	$2,2 \times 10^{-6}$	$4,4 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
100	90,29%	90,31%	93,96%
50	92,27%	92,68%	93,68%
25	91,16%	91,71%	92,25%

4.2.2.2

Influência da Vazão

Analizando a Figura 4.29, observa-se que a elevação no primeiro patamar de densidade ocorre praticamente no mesmo volume adimensional para todas as curvas. A diferença entre elas é bastante sutil, podendo ser atribuída a incertezas experimentais. De todo modo, a primeira transição de densidade apresenta configuração similar nos três casos, com as curvas de vazão baixa e intermediária assumindo comportamentos semelhantes a partir de $V^* = 0,8$, enquanto a curva correspondente à maior vazão apresenta um comprimento de mistura mais acentuado.

Na segunda fase do escoamento, a curva de maior vazão se destaca das demais por se aproximar significativamente da curva ideal de escoamento. As outras curvas mantêm-se bem abaixo, definindo um patamar constante até aproximadamente $V^* = 2,5$. Por fim, as curvas de baixa e média vazão seguem juntas, ascendendo gradualmente até a formação do segundo patamar. Já a curva de maior vazão inicia sua elevação em torno de $V^* = 2,9$, evidenciando um comprimento de mistura mais expressivo. Ao final do escoamento, todas as curvas convergem para um mesmo valor, indicando a completa substituição do fluido deslocado.

Essa diferença significativa no comportamento da curva de maior vazão pode ser explicada pelo fato de a geometria ser concêntrica. Nessa condição, a elevada cinética do escoamento favorece a ocorrência de recirculações nas paredes anulares e, especialmente, na cavidade. Embora essas recirculações possam auxiliar no deslocamento de fluidos remanescentes, também podem ocasionar acúmulo em zonas de estagnação, mantendo o fluido confinado e dificultando sua remoção. Outro fator relevante que contribui para a eficiência do deslocamento é o perfil favorável do escoamento, com densidade crescente ao longo da sequência de injeção. Cabe destacar, ainda, que a tendência associada à maior vazão é o aumento no comprimento da zona de mistura, o que justifica o fato de a curva correspondente demandar maior volume para deslocar a mesma massa de fluido preenchida [55, 53, 54].

Ao observar a primeira etapa do escoamento na Figura 4.30, verifica-se que as curvas estão ordenadas de acordo com o aumento da densidade. A curva correspondente à menor vazão é a que leva mais tempo para iniciar a ascensão, enquanto a curva de vazão intermediária posiciona-se entre os dois extremos, e a curva de maior vazão é a primeira a indicar o início do deslocamento. A zona de mistura das curvas de baixa e média vazão é bastante semelhante, com ambas se sobrepondo ao longo dessa fase inicial do escoamento.

Na segunda etapa, todas as curvas permanecem bastante próximas entre

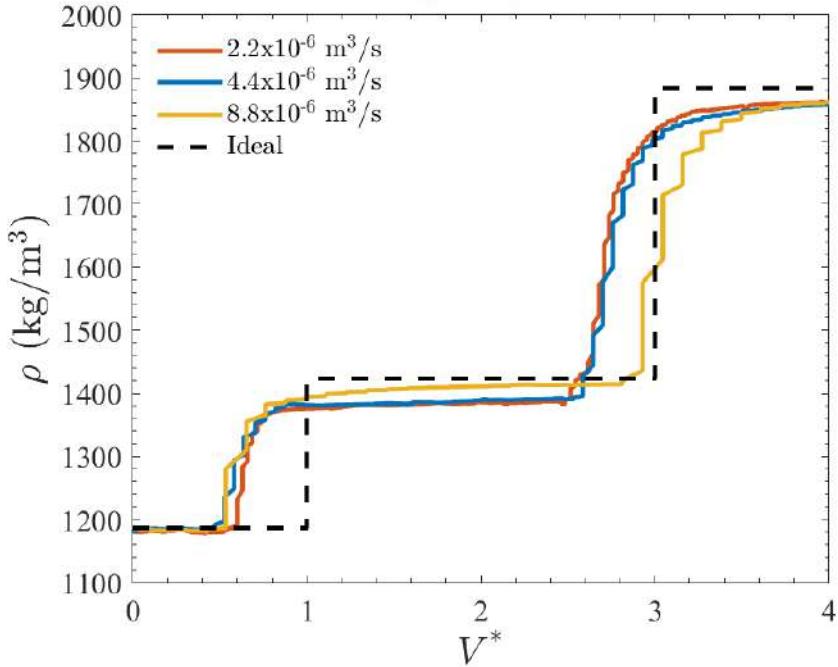


Figura 4.29: Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso concêntrico (standoff = 100%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$, $4,4 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$.

si, aproximando-se progressivamente do comportamento ideal de deslocamento. Logo após $V^* = 2,6$, observa-se uma inversão nas posições das curvas: as curvas de baixa e média vazão apresentam uma subida antecipada da densidade, enquanto a curva de maior vazão inicia sua transição de forma mais tardia. Embora tal comportamento possa parecer contraintuitivo, ele pode ser explicado pela retenção de fluidos remanescentes na cavidade em situações com excentricidade acoplada a altas vazões. Nessas condições, a presença de recirculações no espaço anular dificulta a remoção completa dos fluidos anteriormente injetados.

Além disso, a curva de maior vazão apresenta uma zona de mistura mais extensa, o que também pode ser atribuído à excentricidade. Em contraste, as demais curvas exibem interfaces mais estáveis durante a transição. Ao final do escoamento, todas as curvas convergem em direção à curva de escoamento ideal, sendo evidente, no entanto, que o caso com maior vazão apresenta desempenho inferior no deslocamento dos fluidos remanescentes.

Na Figura 4.31, observa-se que as curvas permanecem bastante próximas entre si durante a primeira etapa do escoamento, com diferenças mínimas em seus comportamentos iniciais. O comprimento da zona de mistura de ambas as curvas é significativamente maior em comparação com os casos anteriores, o que pode ser evidenciado pela inclinação das curvas e pela proximidade em

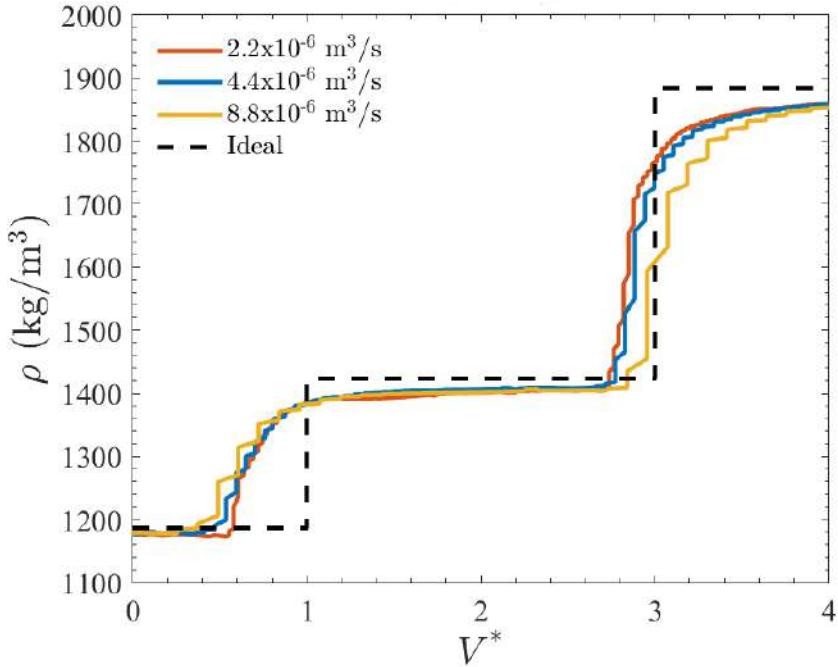


Figura 4.30: Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (*standoff* = 50%), comparando as vazões $2, 2 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$, $4, 4 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ e $8, 8 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$.

relação à curva ideal de escoamento na segunda etapa. Esse comportamento é diretamente associado à elevada excentricidade da geometria: um *standoff* de 25% representa um deslocamento considerável do tarugo central, favorecendo a formação de *fingers* ao longo de todo o escoamento.

Na terceira etapa, praticamente todas as curvas iniciam sua subida simultaneamente. No entanto, as curvas de menor vazão apresentam forte interferência proveniente do acúmulo de fluidos entre o tarugo central e as paredes externas, conforme discutido anteriormente. A curva de vazão intermediária também manifesta esse efeito, embora de forma mais atenuada. Já a curva de maior vazão não exibe ruídos perceptíveis, indicando que, para essa condição geométrica, o aumento da vazão favorece a remoção dos fluidos remanescentes da cavidade, reduzindo os efeitos de aprisionamento.

Ainda na terceira etapa, as curvas aproximam-se entre si, mas com uma defasagem em relação ao volume injetado: as curvas de baixa e média vazão seguem o comportamento da curva de maior vazão, com um leve atraso. Ao final do escoamento, todas atingem um novo patamar de densidade, embora a curva de maior vazão se posicione em um nível inferior em comparação com os casos anteriores, sugerindo um deslocamento menos eficiente ao final do processo.

Ao avaliar o efeito da vazão na Tabela 4.11, observa-se que o aumento

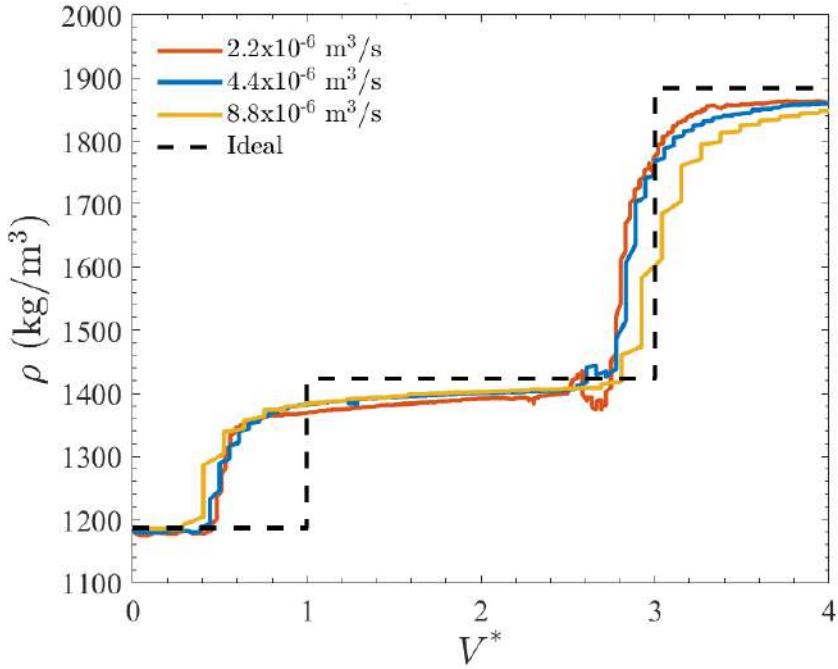


Figura 4.31: Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico ($standoff = 25\%$), comparando as vazões $2, 2 \times 10^{-6} m^3/s$, $4, 4 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8, 8 \times 10^{-6} m^3/s$.

da vazão promove uma melhora moderada na eficiência de deslocamento em todos os níveis de $standoff$. Esse maior diferencial de pressão contribui para vencer as resistências viscosas e as eventuais zonas de recirculação presentes nas regiões mais confinadas, facilitando a remoção do fluido inicialmente presente e a ruptura de filmes residuais aderidos à parede. Dessa forma, a influência da vazão torna-se mais pronunciada que a do $standoff$ nessa configuração, indicando que, a partir de certo ponto, o escoamento é dominado pela energia de cisalhamento imposta pelo fluido de deslocamento, e não pelas variações geométricas da seção anular.

Tabela 4.11: Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.

Vazão (m^3/s)	STO (%)		
	100	50	25
$2, 2 \times 10^{-6}$	92,82%	92,27%	91,16%
$4, 4 \times 10^{-6}$	90,31%	92,68%	91,71%
$8, 8 \times 10^{-6}$	93,96%	93,68%	92,25%

Com os valores de eficiência obtidos e a interpretação qualitativa das curvas de deslocamento, é possível observar que, a partir de determinadas condições operacionais da bancada experimental, o comportamento do escoamento deixa de ser fortemente influenciado pelas variações geométricas do anular. Isso indica que a principal força responsável pelo deslocamento sequencial dos fluidos na seção de teste não está mais associada às diferenças de área entre regiões estreitas causadas pela excentricidade e o arrombamento, mas ao campo de tensões gerado pela maior deformação imposta pelo fluido deslocador.

Em vazões reduzidas, quando o gradiente de pressão é menor, predominam os efeitos geométricos, e as regiões excêntricas ou de transição abrupta de seção favorecem a formação de zonas de estagnação. À medida que a taxa de injeção aumenta, o campo de cisalhamento se intensifica e o comportamento pseudoplástico do fluido se torna mais evidente, reduzindo a viscosidade aparente.

Dessa forma, o processo de deslocamento passa a ser controlado essencialmente pelas propriedades reológicas do fluido, em especial pela sua capacidade de ajustar a viscosidade conforme a taxa de deformação aplicada. Esse fenômeno explica a tendência saturação observada nas maiores vazões, uma vez que o sistema atinge um ponto em que o acréscimo de energia de cisalhamento já é suficiente para anular os efeitos da geometria, tornando os ganhos adicionais de eficiência pouco expressivos.

4.2.3

Cenários com soluções aquosas de Carbopol

Os gráficos seguintes representam o deslocamento com diferentes soluções aquosas de Carbopol. O primeiro fluido é uma solução aquosa com 0,10% de Carbopol (fluido amarelo), o segundo é 0,15% de Carbopol (fluido azul) e o terceiro é 0,20% de Carbopol (fluido transparente). A curva pontilhada que se segue representa um escoamento ideal, caso o escoamento fosse completamente perfeito.

4.2.3.1

Influência do STO(%)

Ao fixar a menor vazão e variar as excentricidades, conforme ilustrado na Figura 4.32, observa-se que as tendências seguem o mesmo padrão dos casos anteriores. A curva azul, correspondente à maior excentricidade, apresenta uma saída precoce, resultante da formação de *fingers*. Em seguida, a curva laranja inicia sua subida. Ambas as curvas exibem subidas semelhantes, com um ponto de cruzamento em $V^* \sim 0,7$. A curva azul demonstra um maior comprimento

de mistura, resultando em uma subida mais gradual. Em contraste, a curva laranja apresenta uma queda local na densidade, decorrente da dificuldade de deslocamento do fluido 1. Essa queda é menos acentuada na curva azul, devido ao maior comprimento de mistura.

Em torno do ponto de coordenadas $V^* = 1,6$, as curvas voltam a se encontrar, iniciando uma aproximação ao platô ideal. No entanto, é possível observar comportamentos distintos: a curva laranja forma um platô de densidade mais acentuado, com uma subida mais linear, enquanto a curva azul adota um comportamento mais parabólico. Essa diferença pode ser explicada por meio das imagens de interface, que evidenciam que esses efeitos são essencialmente viscosos.

A partir de aproximadamente $V^* \simeq 2,5$, a curva azul começa a aumentar sua densidade, sendo seguida pela curva laranja. Novamente, a curva referente ao caso concêntrico exibe uma subida mais acentuada, enquanto a curva associada à maior excentricidade apresenta um comprimento de mistura que aparentemente melhora a eficiência do deslocamento.

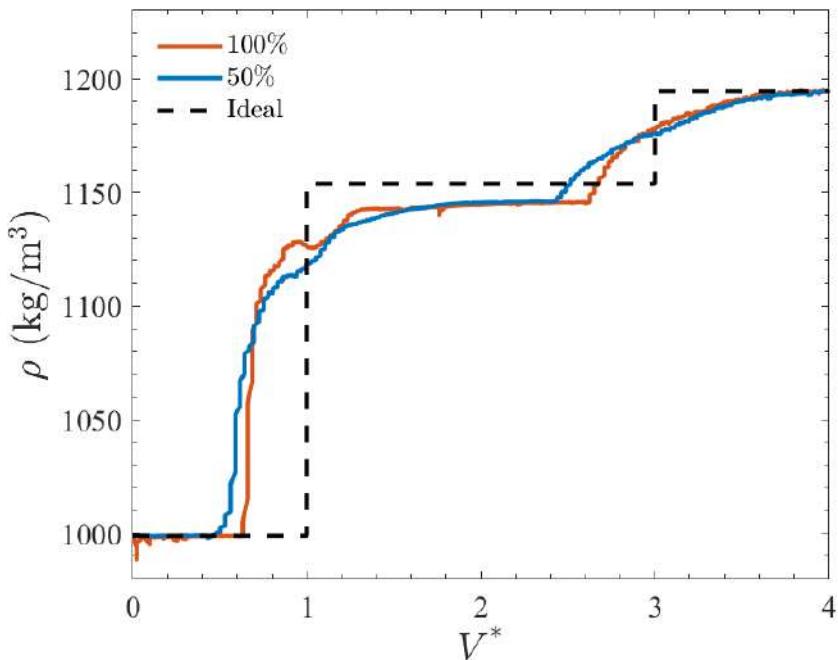


Figura 4.32: Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 50% e 100% de STO, para a vazão média de $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Ao se proceder ao aumento da vazão e à subsequente comparação das excentricidades, conforme ilustrado na Figura 4.33, é possível observar uma tendência semelhante às curvas anteriores no início do escoamento. No entanto, é evidente uma discrepância substancial na ascensão de cada curva, que se apresenta mais pronunciada e situa-se em aproximadamente $V^* \simeq 1,0$ para

a velocidade de reação. Durante a transição entre os estágios, observa-se uma redução em ambas as curvas, atribuída ao aumento do comprimento de mistura, conforme demonstrado nas Figuras 4.40 e 4.41.

No segundo estágio, as curvas mantêm um comportamento semelhante ao observado na Figura 4.32, mas com diferenças na ordem de ascensão. A curva de excentricidade de 50% apresenta uma inclinação inicial mais baixa, iniciando sua subida em torno de $V^* = 2,5$, com um aumento no comprimento de mistura devido à combinação de excentricidade e vazão. A curva de 100%, por outro lado, atinge o nível ideal mais rapidamente, uma vez que a interface do *plug* requer um volume bombeado menor para atingir esse estado. Em ambos os casos, os comportamentos são semelhantes, sendo diferenciados pelos efeitos combinados da vazão e da excentricidade. Tais fatores influenciam os fenômenos viscosos de fluidos sujeitos à tensão de escoamento, sendo esses efeitos intensificados pela compressão e expansão do escoamento, as quais ocasionam a deformação e reorganização das interfaces ao longo do experimento.

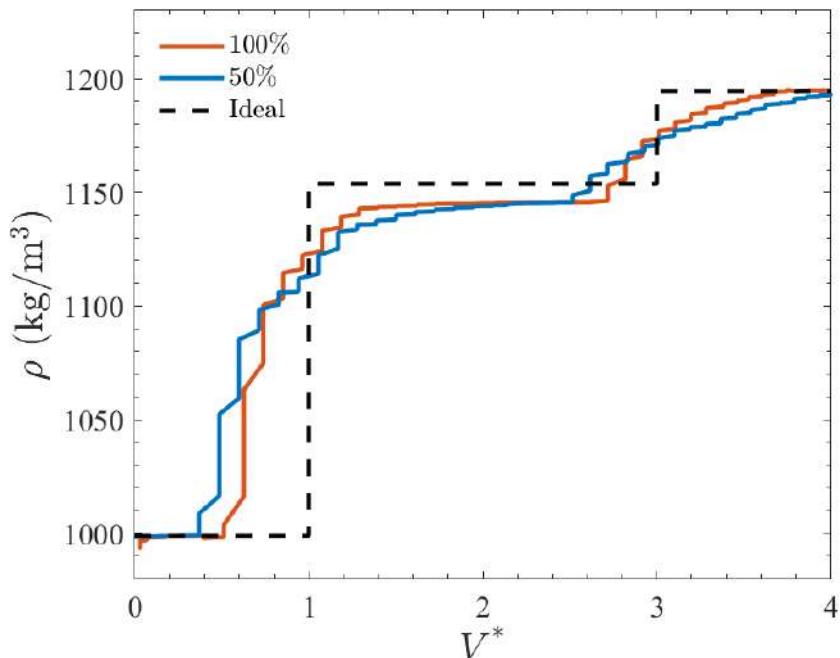


Figura 4.33: Evolução da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado, comparando as condições de 50% e 100% de STO, para a vazão média de $8,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Na Tabela 4.12, observa-se que a variação do *standoff* apresenta um efeito relativamente pequeno sobre a eficiência de deslocamento no fluido Carbopol (efeito observado no caso anterior), com diferenças inferiores a 2,5%. Isso indica que, dentro da realidade dos testes, a excentricidade não é o fator dominante neste deslocamento do fluido. O leve aumento de eficiência com

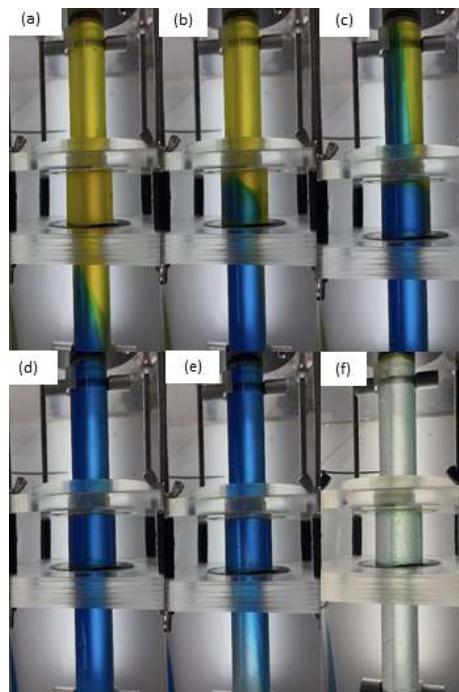


Figura 4.34: Visualização do escoamento em 50% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0, 10%, o azul o de 0, 15% e o transparente o de 0, 20% na vazão de $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

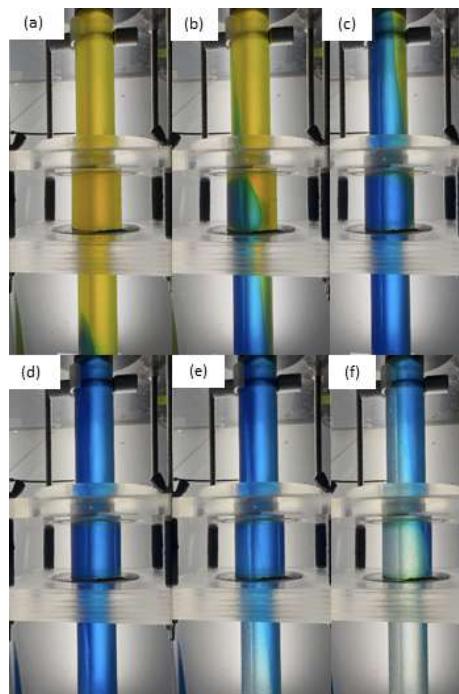


Figura 4.35: Visualização do escoamento em 50% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0, 10%, o azul o de 0, 15% e o transparente o de 0, 20% na vazão de $8,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

vazões maiores sugere que a força de cisalhamento do fluido é mais significativa que o *standoff*, efeito observado anteriormente também, o que é consistente com o comportamento típico de fluidos viscoelásticos, nos quais a distribuição de

tensão de cisalhamento tende a homogenizar o deslocamento em regiões com geometria uniforme.

Tabela 4.12: Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical.

STO (%)	Vazão (m^3/s)	
	$2,2 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
100	91,69%	92,99%
50	90,63%	90,63%

4.2.3.2 Influência da Vazão

Na Figura 4.36, para ambos os casos, as curvas iniciam com densidade igual à ideal, considerando que apenas o fluido 1 está presente na seção de teste. A partir do volume adimensional $V^* = 0,5$, a curva associada à maior vazão inicia uma tendência ascendente, indicando um aumento da densidade. Posteriormente, em $V^* = 0,7$, a curva de menor vazão apresenta um incremento. Essa transição abrupta deve-se às diferenças significativas entre a viscosidade e a densidade dos fluidos.

A curva de menor vazão ultrapassa a curva de maior vazão, permanecendo acima desta até atingir o ponto de igualdade. Esse fenômeno ocorre porque, em maiores vazões, há uma tendência de aumento das zonas de mistura, o que é evidenciado pela suavização da subida da curva.

No segundo estágio do escoamento, com valores de V^* entre 1,0 e 3,0, ambas as curvas convergem e apresentam um aumento mais gradual da densidade, aproximando-se do segundo platô ideal. Contudo, as curvas não atingem completamente esse platô, devido à presença de fluidos residuais nas paredes do anel e na cavidade.

Em conformidade com o valor de V^* igual ou superior a 2,0, o jogo de válvulas é ativado, iniciando-se, subsequentemente, a injeção do fluido 3. No terceiro estágio, cuja faixa de variação de V^* está compreendida entre 3,0 e 4,0, as curvas aproximam-se do terceiro platô de densidade. A curva com a vazão mais baixa permanece acima, apresentando um comportamento mais estável, enquanto a curva com a vazão mais elevada exibe uma mistura mais intensa, o que caracteriza instabilidades no escoamento.

Ambas as curvas aproximam-se do platô de densidade final, demonstrando eficiência próxima da ideal. Esse comportamento é corroborado pelas imagens registradas durante o experimento, mostradas na Fig.4.36.

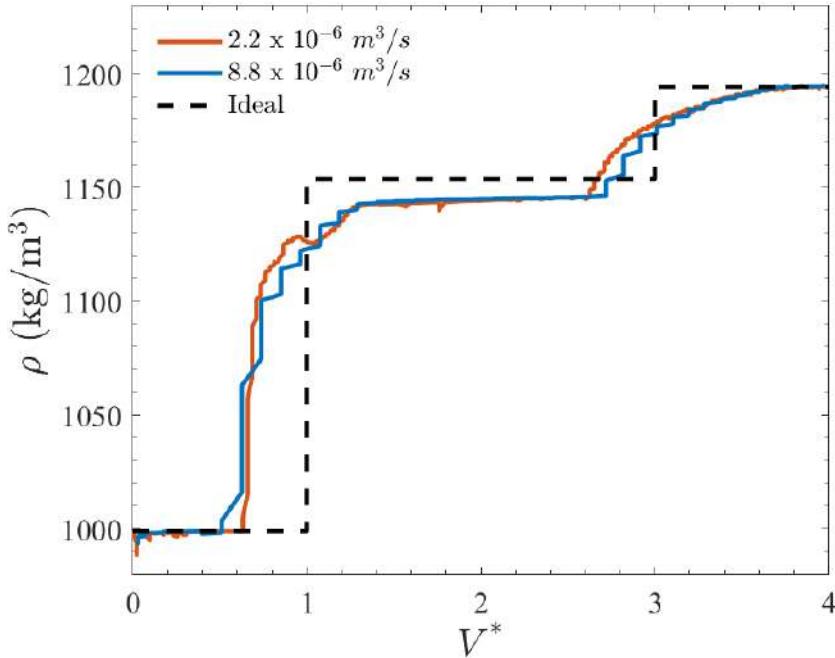


Figura 4.36: Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso concêntrico (standoff = 100%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $8,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

Na Figura 4.37, observa-se uma interface de escoamento com formato de "sela de cavalo", indicando uma interface organizada, conforme esperado em um escoamento concêntrico. Contudo, em virtude dos efeitos viscosos dos fluidos não newtonianos, tais interfaces sofrem leves distorções. Após a entrada na cavidade, o escoamento estabiliza, formando um padrão de tampão ideal, conforme ilustrado na Figura 4.37(b). Na saída da zona de contração, o segundo fluido sofre perturbações, alterando levemente o comportamento observado (Figura 4.37(c)).

Um ponto de interesse é a formação de uma terceira cor (verde), resultante da mistura dos fluidos, destacando as zonas de mistura, predominantemente localizadas na frente do escoamento.

No terceiro estágio, o fluido 3, caracterizado por uma maior viscosidade e densidade, induz um deslocamento mais acentuado. A análise das imagens apresentadas na Figura 4.37 ((d), (e) e (f)) permite concluir que, com a passagem do fluido 3, a seção de teste adquire maior transparência. Contudo, o acúmulo de fluidos residuais na zona alargada demonstra que a eficiência do deslocamento não atinge 100%.

A Figura 4.38 representa o teste com maior vazão, no qual as zonas de mistura são acentuadas por efeitos viscosos, gerando instabilidades conhecidas como *Saffman-Taylor*. A ocorrência desses fenômenos deve-se à diferença de viscosidade entre os fluidos, que origina *fingers* que percorrem trajetórias

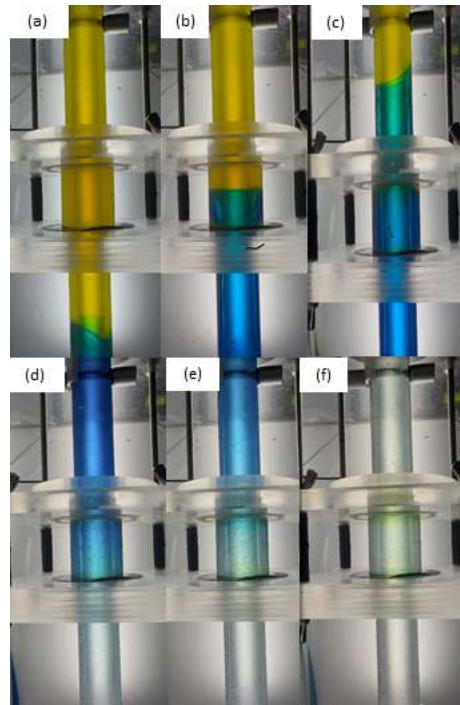


Figura 4.37: Visualização do escoamento em 100% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0, 10%, o azul o de 0, 15% e o transparente o de 0, 20% na vazão de $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

preferenciais no escoamento. Após a reentrada na zona de compressão, os dedos reaparecem de forma mais proeminente.

A passagem do fluido 3, apesar de sua maior densidade, segue pelos mesmos caminhos preferenciais, corroborando os resultados gráficos. A presença de resíduos de fluido nas cavidades ainda é visível; contudo, o deslocamento é ligeiramente superior ao observado em vazões mais reduzidas.

A análise da influência da vazão, apresentada na Figura 4.39, revela que as curvas no início do escoamento exibem um comportamento semelhante às curvas em condições anteriores. No entanto, é possível identificar uma discreta diferença na curva de baixa vazão, a qual apresenta um aumento com menor nível de ruído. Ao comparar com a Figura 4.36, o gráfico mostra uma zona de mistura maior no primeiro estágio, resultando em uma transição mais suave entre os níveis em aproximadamente $V^* \simeq 1,0$. Essa suavidade é atribuída à presença de *fingers*, conforme demonstrado nas Figuras 4.40 e 4.41.

No segundo estágio do escoamento, é evidente um comportamento distinto entre as curvas. Ambas apresentam um aumento contínuo da densidade, aproximando-se cada vez mais do valor ideal. As curvas permanecem próximas entre si, indicando que o impacto do escoamento no deslocamento é reduzido nesse estágio.

No terceiro estágio, a curva de vazão inferior permanece consistentemente

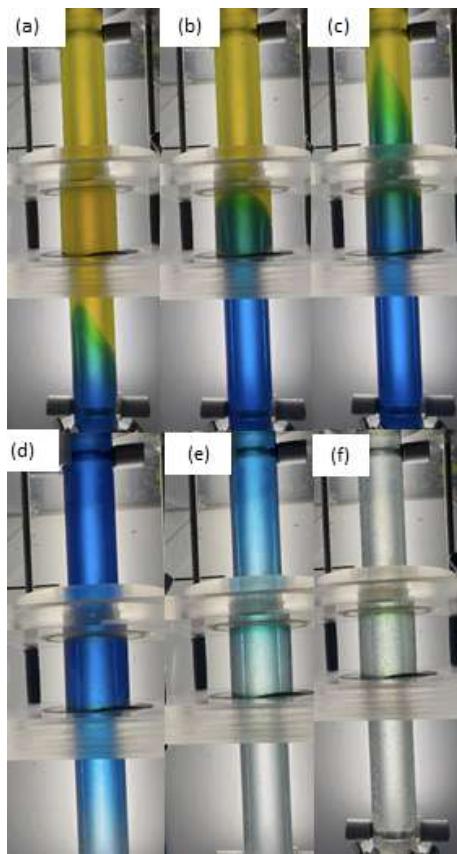


Figura 4.38: Visualização do escoamento em 100% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0, 10%, o azul o de 0, 15% e o transparente o de 0, 20% na vazão de $8,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

acima da curva de maior vazão, demonstrando uma diferença significativa no deslocamento. Outro aspecto relevante é a excentricidade de 50%, que resulta em maior retenção de fluido no lado esquerdo da imagem (região com menos espaço no anular).

Após a conclusão do experimento, foram observados vestígios de fluido na seção de teste. Esse fato indica que o aumento da vazão proporciona uma melhoria no deslocamento, embora não elimine completamente a retenção de fluidos. Sobretudo ao comparar as imagens finais em 4.40(c) e 4.41(f), verifica-se que a retenção de fluido é exacerbada pela excentricidade, aumentando a probabilidade de acúmulo de resíduos nas paredes do anular.

Na Figura 4.42, é possível identificar claramente o lado com menor espaço no anular para $STO = 50\%$. O acúmulo de resíduos é notavelmente mais evidente, com diferenças nos tons de azul nas imagens comparadas, reforçando a influência da excentricidade e da vazão no comportamento do escoamento.

A mudança de vazão apresenta um efeito moderado sobre a eficiência de deslocamento, como mostra na Tabela 4.13, especialmente em $STO = 100\%$, onde a eficiência tende a aumentar com a vazão. Isso é consistente

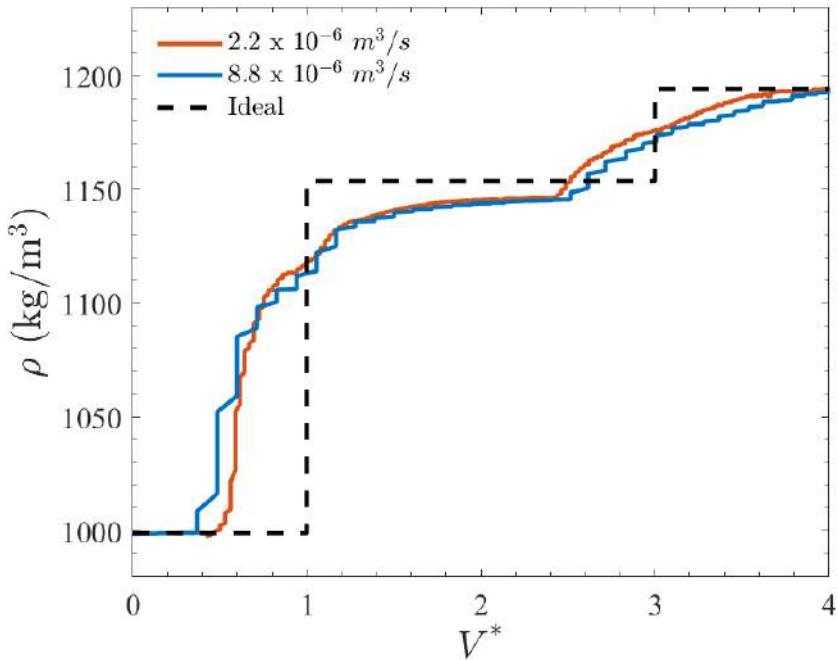


Figura 4.39: Variação da densidade dos fluidos em função do volume adimensional bombeado para o caso excêntrico (standoff = 50%), comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $8,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

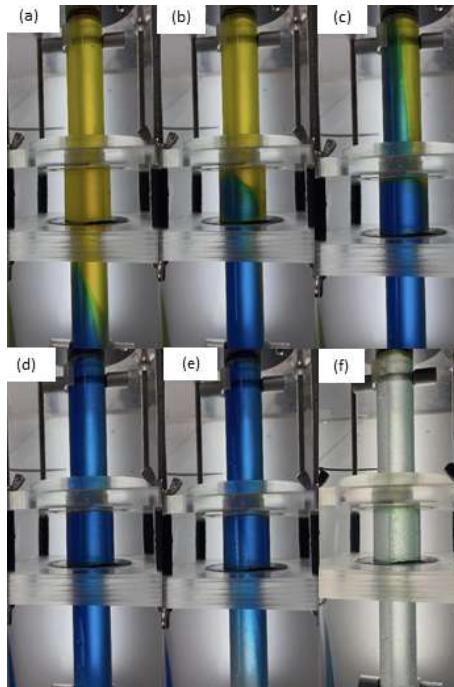


Figura 4.40: Visualização do escoamento em 50% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0, 10%, o azul o de 0, 15% e o transparente o de 0, 20% na vazão de $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

com o comportamento de fluidos à base de Carbopol, a aplicação de maiores taxas de cisalhamento (maior vazão) reduz a formação de plugue e aumenta a mobilização do fluido residual, aumentando a eficiência do deslocamento. Para

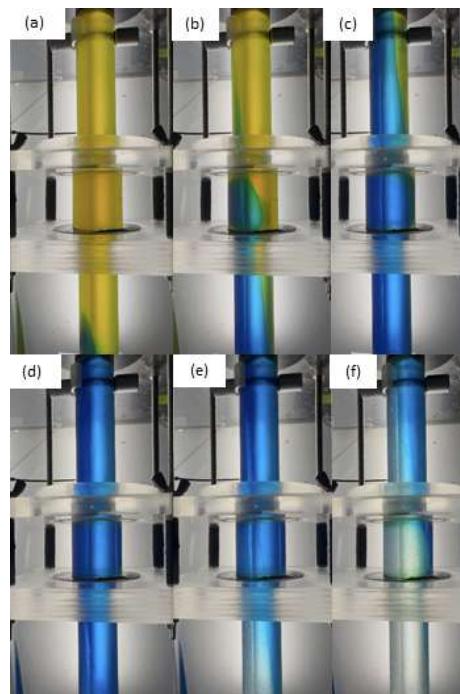


Figura 4.41: Visualização do escoamento em 50% STO, vertical, sendo o fluido amarelo o fluido de 0, 10%, o azul o de 0, 15% e o transparente o de 0, 20% na vazão de $8,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

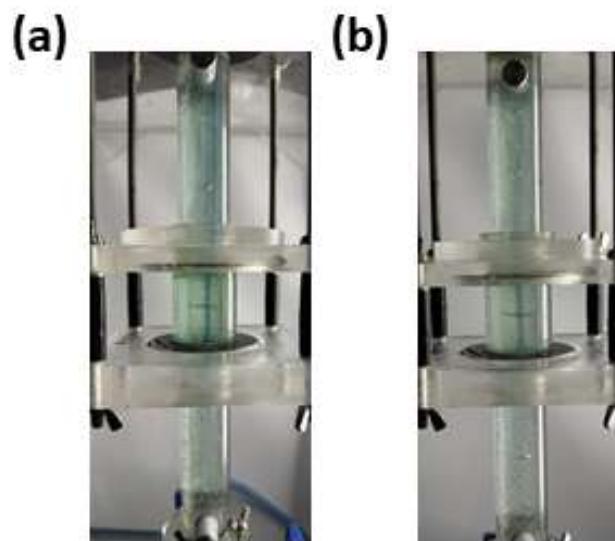


Figura 4.42: Resíduo na cavidade STO= 50%: (a) baixa vazão e (b) alto vazão.

STO = 50%, a eficiência é levemente inferior, sugerindo que a proximidade da parede do anular limita o escoamento em algumas regiões, mas o efeito da vazão ainda é mais relevante que o *standoff*. Esses efeitos são observados também nos casos do fluido de perfuração.

Tabela 4.13: Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento no caso vertical

Vazão (m^3/s)	STO (%)	
	100	50
$2,2 \times 10^{-6}$	91,69%	90,83%
$8,8 \times 10^{-6}$	92,99%	90,63%

4.2.3.3 Influência da Inclinação

Além da análise do comportamento em escoamento vertical, os mesmos valores de excentricidade e vazão foram utilizados, mas com a seção de testes inclinada a 60° . O objetivo consistiu em avaliar os efeitos gravitacionais no modelo físico e os impactos da inclinação no deslocamento dos fluidos com base Carbopol.

Para a menor vazão, conforme demonstrado na Figura 4.43, é possível observar uma discreta diferença na elevação da densidade entre as curvas, um comportamento característico das análises envolvendo diferenças de excentricidade e esperado neste tipo de estudo. Particularmente para casos excêntricos, a formação de *fingers* é evidente, sendo ainda mais agravada pela inclinação, que intensifica a instabilidade devido à presença de componentes gravitacionais ausentes em configurações verticais.

Na primeira transição de patamar, as duas curvas permanecem muito próximas, com uma diferença desprezível. Durante o segundo patamar de densidade, as curvas mantêm-se semelhantes. No entanto, na segunda subida de densidade, a curva do caso excêntrico apresenta uma subida antecipada em relação à curva concêntrica, com uma diferença mais pronunciada entre os momentos. A curva azul exibe um comprimento de mistura mais acentuado, uma característica dos *fingers*, embora ambas as curvas permaneçam relativamente próximas.

A Figura 4.44 ilustra o caso inclinado com baixa vazão e configuração excêntrica. Durante o movimento dos fluidos, em condições favoráveis de densidade, a formação de *fingers* é notável. A coluna central do anular, que representa a coluna de perfuração, encontra-se deslocada para a parte inferior da seção de teste. Mesmo com a injeção de um fluido mais pesado, este desloca-se predominantemente pela parte superior, seguindo o caminho de menor resistência. Na região da cavidade, o fluido preenche a interface, ocupando todo o espaço disponível. À medida que a compressão é aplicada, o fluido

deslocado escoa com *fingers* mais acentuados em direção à parte superior da seção experimental.

O mesmo fenômeno é observado quando o terceiro fluido desloca os remanescentes, conforme demonstrado na Figura 4.44 (d), (e) e (f). Na Figura 4.44(f), é visível que a eficiência do deslocamento no caso inclinado é inferior à do caso vertical, com maior quantidade de fluido retida na cavidade e na parte inferior de toda a seção de teste. Outra evidência dessa redução na eficiência é a maior distância das curvas em relação à curva de referência na Figura 4.32, comportamento oposto ao observado no caso vertical.

As curvas da Figura 4.45 ilustram o caso inclinado, concêntrico e com vazão baixa. Na primeira etapa, o fluido 2 desloca o fluido 1, aproximando a interface de um *plug*, resultando em uma leve inclinação esperada devido às componentes de forças existentes no experimento. Ao atingir a zona alargada, a interface torna-se mais inclinada em consequência da expansão do escoamento. Após a compressão, o fluido apresenta uma inclinação ainda mais acentuada, um comportamento característico da compressão do escoamento.

Quando o terceiro fluido é injetado, o escoamento segue a mesma tendência, respeitando a inclinação da interface. No final do teste, observa-se que a seção permanece mais "suja" do que no caso vertical. Adicionalmente, ao comparar os casos inclinados na Figura 4.44, observa-se que a eficiência do caso com 100% de vazão é superior à do caso com 50%, fato corroborado pela diferença observada no último patamar do gráfico.

Na Figura 4.46, observa-se um comportamento análogo ao da figura anterior. A principal diferença está presente nas imagens do experimento e nos momentos de subida de cada patamar de densidade, devido à vazão ser três vezes maior. Outra diferença notável é o aumento do comprimento de mistura entre as transições de patamar.

Conforme demonstrado nas Figuras 4.47 (a), (b) e (c), os *fingers* apresentam uma maior extensão. Na cavidade, no caso excêntrico, o fluido 2 não se expande facilmente. Já no caso concêntrico, a interface do fluido 2 adquire uma forma de *plug*, permitindo uma limpeza mais eficiente.

A interface na curva azul apresenta instabilidades hidrodinâmicas na parte superior do duto. No caso concêntrico, observa-se uma leve inclinação na interface ao longo da seção de teste, mantendo a tendência esperada. Por fim, pelas imagens das Figuras 4.47(f) e 4.48(f), é possível verificar que, ao final de cada teste, ainda há resíduos. Conforme observado no caso anterior, verificou-se uma redução na eficiência em comparação com o caso vertical. No entanto, entre os casos inclinados com maior vazão, observou-se uma ligeira melhoria no deslocamento.

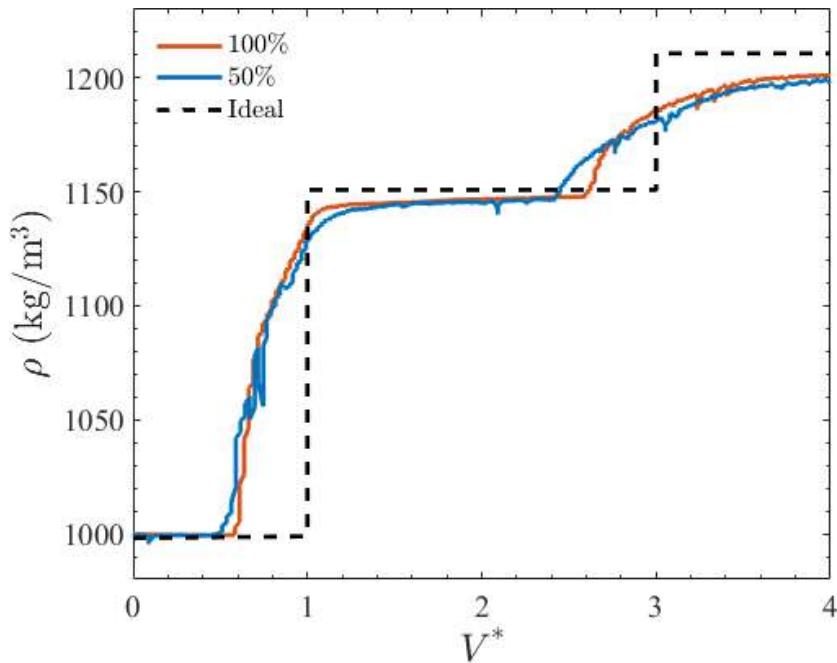


Figura 4.43: Evolução da densidade em função do volume adimensional bombeado, com a bancada inclinada a 60° , considerando a vazão de $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e comparando as excentricidades de 100% e 50% de STO.

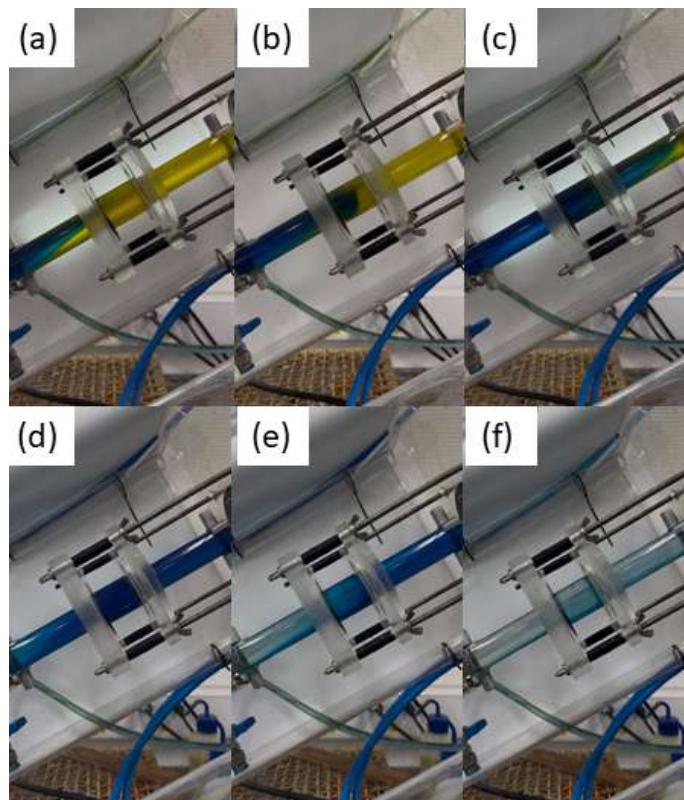


Figura 4.44: Visualização do escoamento em 50% STO e em baixa vazão uma inclinação de 60° .

Na Figura 4.49, é possível observar que as curvas apresentam essencialmente o mesmo momento ascendente, sendo as diferenças entre elas

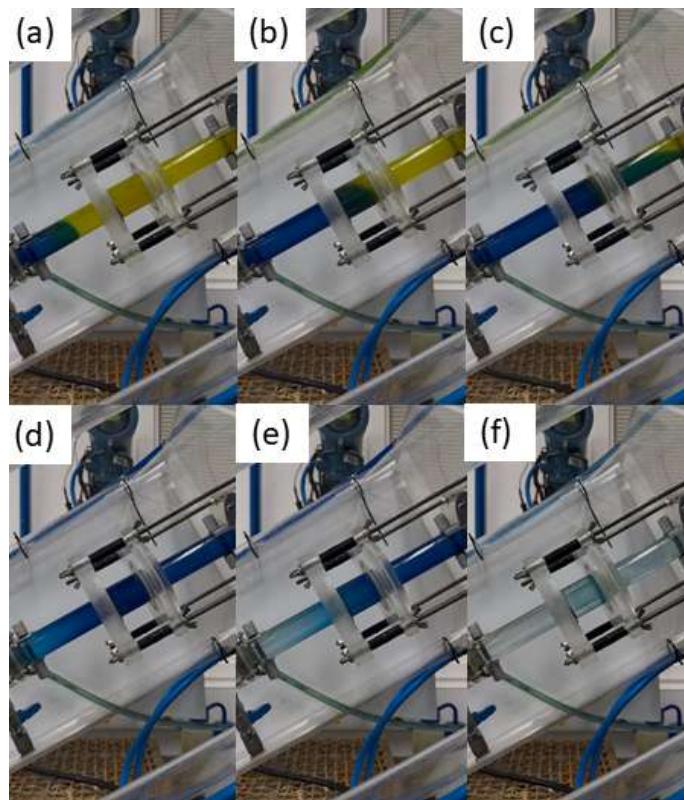


Figura 4.45: Visualização do escoamento em 100% STO e em baixa vazão uma inclinação de 60°.

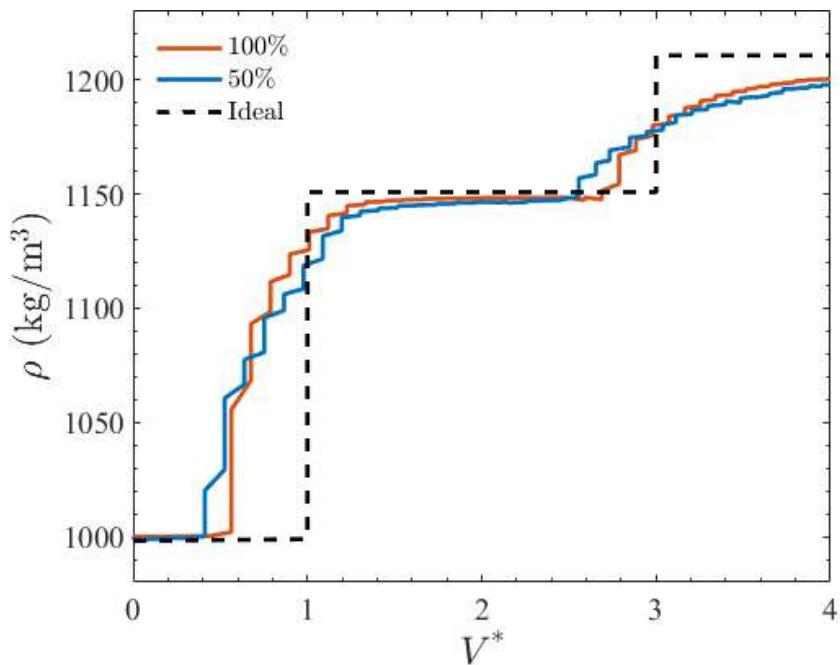


Figura 4.46: Evolução da densidade em função do volume adimensional bombeado, com a bancada inclinada a 60°, considerando a vazão de $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$ e comparando as excentricidades de 100% e 50% de STO.

consideradas erros experimentais. As curvas apresentam a mesma tendência durante a transição no deslocamento com o fluido 2, com a curva de maior

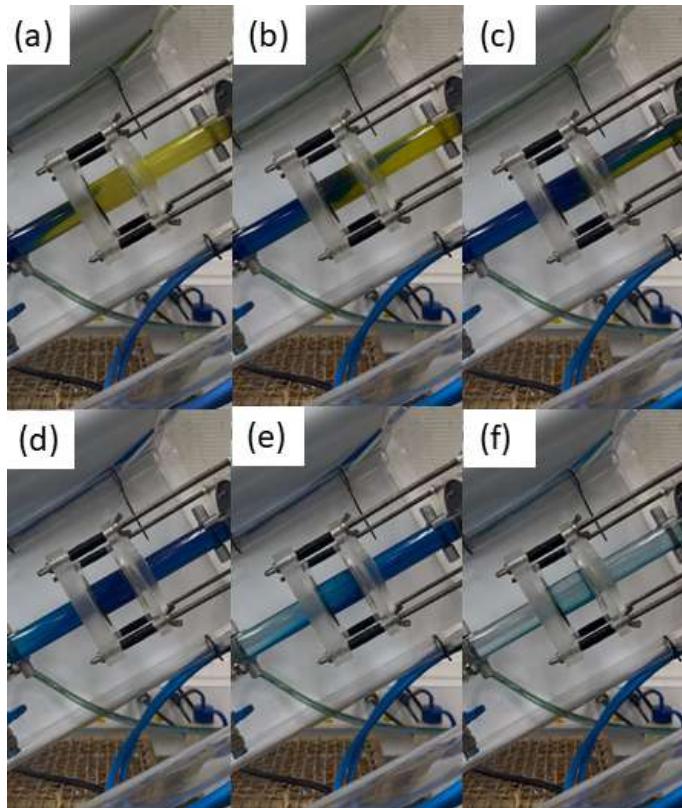


Figura 4.47: Visualização do escoamento em 50% STO na maior vazão em uma inclinação de 60°.

vazão exibindo uma zona de mistura ligeiramente maior e aproximando-se da linha ideal em comparação com a curva de menor vazão. Em todos os deslocamentos, os fluidos seguem as tendências observadas nos casos inclinados anteriores. No caso excêntrico, os fluidos fluem predominantemente pela parte superior, enquanto no caso concêntrico o escoamento apresenta uma leve inclinação na parte inferior, possivelmente devido ao maior peso do fluido.

Outro aspecto que chama a atenção é que, no gráfico, a curva de menor vazão atinge o final antes da curva de maior vazão. Esse efeito pode parecer contraintuitivo, mas pode ser explicado pelo comportamento não newtoniano do Carbopol, combinado com o fator inclinação. As imagens de teste para cada caso mostram que o caso de menor vazão tem uma capacidade de lavagem ligeiramente maior em comparação ao caso de maior vazão (ver Figuras 4.45 e 4.48).

A análise da Figura 4.50 permite concluir que a alteração da excentricidade provoca uma discrepância significativa na densidade, com a curva azul surgindo antes da curva laranja. Outra diferença observável está relacionada à zona de mistura, que é mais favorecida na curva de maior vazão, resultando em um aumento um pouco mais atenuado. No segundo nível de densidade, as

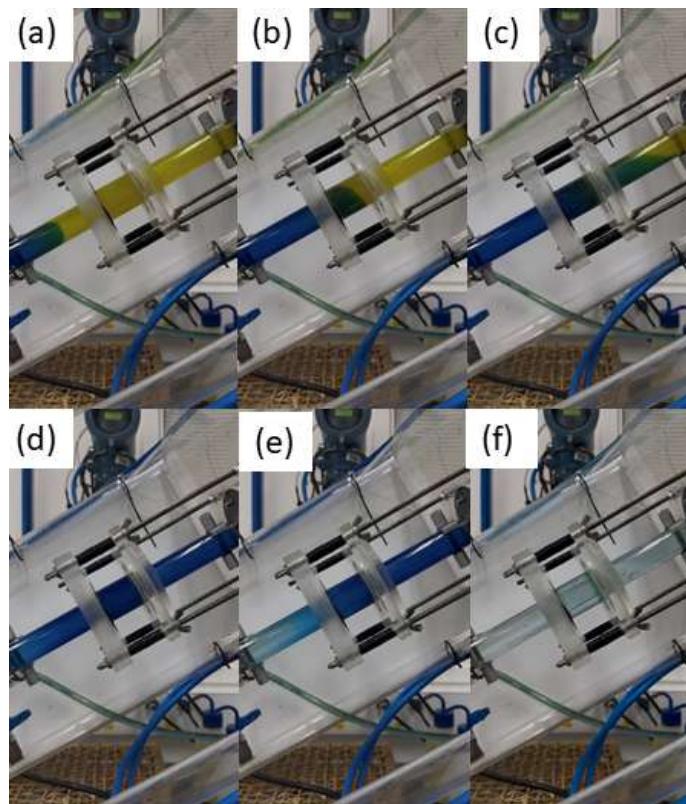


Figura 4.48: Visualização do escoamento em 100% STO na maior vazão em uma inclinação de 60°.

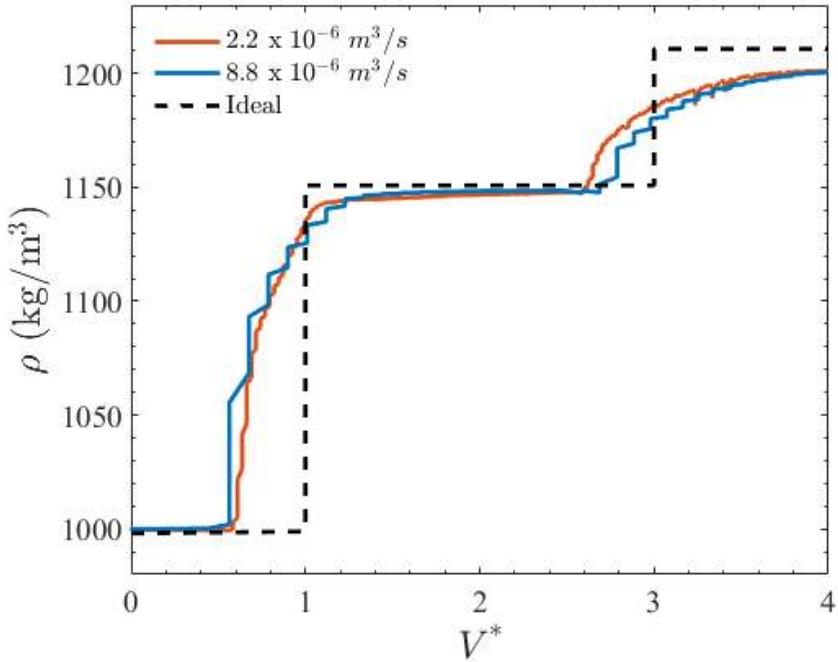


Figura 4.49: Evolução da densidade em função do volume adimensional bombeado, com a bancada inclinada a 60° e considerando STO de 100% e comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e $8,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$.

curvas permanecem bastante semelhantes entre si, aproximando-se da curva de deslocamento ideal.

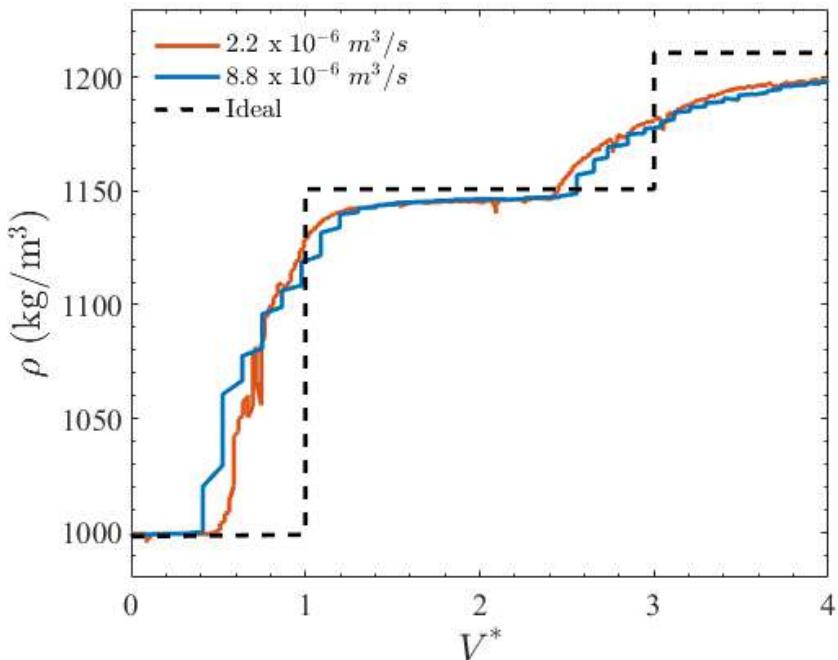


Figura 4.50: Evolução da densidade em função do volume adimensional bombeado, com a bancada inclinada a 60° , considerando STO de 50% e comparando as vazões $2,2 \times 10^{-6} m^3/s$ e $8,8 \times 10^{-6} m^3/s$

O mesmo fenômeno observado no caso anterior repete-se neste caso, com a curva de maior vazão emergindo após a de menor vazão, apresentando, desta vez, uma diferença menor entre ambas, embora ainda discrepante do esperado. Na transição para o terceiro nível, essa diferença é mais atenuada, e as curvas permanecem mais próximas umas das outras do que no caso concêntrico. Isso mostra que a eficiência, em função da distância, é ligeiramente inferior em comparação com o caso anterior, mantendo-se mais distante do deslocamento ideal.

Pode observar que na Tabela 4.14, o efeito do *standoff* em um ângulo de 60° também é pequeno, similar ao observado no vertical, com variações inferiores a 1,2%.

Tabela 4.14: Influência do STO sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 60° .

STO (%)	Vazão (m^3/s)	
	$2,2 \times 10^{-6}$	$8,8 \times 10^{-6}$
100	92,59%	92,60%
50	91,81%	91,53%

A eficiência relativamente estável sugere que a gravidade e a inclinação não alteram significativamente o deslocamento do fluido em ângulos moderados, corroborando resultados experimentais anteriores reportados na literatura [10], onde escoamentos de fluidos não newtonianos apresentam resistência ao deslocamento relativamente uniforme em geometria anular inclinada.

A Tabela 4.15 mostra ao comparar os resultados para diferentes vazões, nota-se que o aumento da vazão não apresenta efeito significativo sobre a eficiência do deslocamento, com variações inferiores a 0,1% para $STO = 100\%$ e inferiores a 0,3% para $STO = 50\%$.

A ausência de efeito significativo da vazão sobre a eficiência corrobora a hipótese de que o escoamento é dominado por forças viscosas e pela diferença de densidade, e não por efeitos inerciais, conforme discutido na revisão de literatura sobre deslocamento de fluidos não newtonianos em anulares inclinados [10].

Tabela 4.15: Influência das vazões sobre a eficiência de deslocamento com a bancada inclinada a 60° .

Vazão (m^3/s)	STO (%)	
	100	50
$2,2 \times 10^{-6}$	92,59%	91,81%
$8,8 \times 10^{-6}$	92,60%	91,53%

5

Conclusão

A análise detalhada de diferentes cenários de deslocamento em meios anulares revelou padrões relevantes na interação entre reologia, vazão, excentricidade e inclinação. Fluidos com maior viscosidade e tensão limite de escoamento mostraram-se menos eficientes na substituição completa do fluido previamente presente na geometria anular, especialmente em configurações excêntricas com zonas alargadas. Nessas condições, a combinação entre as características reológicas dos fluidos e as restrições geométricas do escoamento favoreceu a formação de zonas de estagnação reologicamente induzidas, nas quais o fluido remanescente permaneceu aprisionado mesmo sob bombeamento contínuo. Esse efeito foi particularmente crítico em geometrias com elevada excentricidade, nas quais o estreitamento do espaço anular inferior intensificou a retenção de fluido, como evidenciado pela persistência de resíduos mesmo em altas vazões.

O aumento da vazão mostrou-se uma ferramenta eficaz para amenizar instabilidades de interface, reduzindo a formação de *fingers* do tipo *Saffman-Taylor* em fluidos newtonianos. Contudo, esse incremento também apresentou limitações: em determinadas condições, o aumento da vazão intensificou a difusão na interface, resultando na formação de zonas de mistura pouco definidas e comprometendo a nitidez da frente de deslocamento. Esse comportamento foi mais pronunciado em geometrias inclinadas, nas quais a ação gravitacional promoveu a formação de canais preferenciais na região superior do anular. Para fluidos viscoplásticos, a tensão limite de escoamento contribuiu para interfaces mais estáveis em baixas vazões, mas também dificultou a remoção completa de resíduos sob altas taxas de cisalhamento, quando o escoamento local não superou o limite de escoamento do fluido deslocado.

A inclinação do sistema mostrou-se um fator determinante para a estratificação dos fluidos. Para ângulos acima de 30° , a influência da gravidade tornou-se predominante, promovendo a segregação dos fluidos e resultando na formação de bolsões persistentes de fluido menos denso nas regiões superiores do anular. Esse efeito foi particularmente crítico em pares de fluidos com grande diferença de densidade, pois a flutuabilidade do fluido deslocado induziu padrões assimétricos de escoamento. Notavelmente, os fluidos mais densos e viscosos demonstraram um desempenho superior no deslocamento, pois, apesar da maior resistência ao escoamento, sua elevada viscosidade ajudou a manter a integridade da interface, reduzindo a dispersão do fluido deslocado e promovendo um avanço mais uniforme.

A interação entre excentricidade e vazão revelou-se um fator essencial para a otimização do deslocamento. Em configurações com baixa excentricidade (*standoff* > 50%), o escoamento mostrou-se mais estável e previsível, aproximando-se do comportamento ideal. No entanto, com o aumento da excentricidade, surgiram desafios adicionais, especialmente em baixas vazões. Nessas condições, a geometria assimétrica, aliada à reologia não newtoniana, favoreceu a formação de regiões de recirculação localizadas. Essas regiões de recirculação atuaram como zonas de retenção temporária do fluido deslocado, dificultando sua completa remoção e impactando a eficiência do deslocamento.

Os resultados deste estudo destacam a importância de protocolos integrados que aliem o ajuste preciso das propriedades reológicas ao controle geométrico do escoamento. A escolha de fluidos com comportamento reológico ajustável, equilibrando tensão limite de escoamento e viscosidade aparente, mostrou-se eficaz na redução da sedimentação e na mitigação de zonas estagnadas. Além disso, a correlação entre dados experimentais e modelos preditivos aponta para a viabilidade de sistemas de controle em tempo real, permitindo ajustes dinâmicos de parâmetros operacionais, como vazão e excentricidade, para otimizar a eficiência do deslocamento.

As implicações práticas desta pesquisa estendem-se além da cimentação primária, abrangendo operações como completação de poços, injeção de estimulantes químicos e recuperação avançada de petróleo. Recomenda-se, em trabalhos futuros, a exploração de modificadores reológicos, configurações geométricas alternativas e condições operacionais mais amplas (vazões, excentricidades e inclinações variadas), de modo a aprofundar a compreensão dos mecanismos identificados.

A integração entre dados experimentais e modelos computacionais de alta fidelidade (*CFD*) representa um avanço promissor, permitindo o desenvolvimento de protocolos adaptativos para poços não convencionais e ampliando as aplicações práticas dos resultados obtidos neste estudo. Essa conexão entre ciência experimental e engenharia aplicada constitui um caminho estratégico para a otimização de operações em poços complexos.

6

Referências bibliográficas

- [1] ALEXANDROU, A. N.; MCGILVREAY, T. M. ; BURGOS, G.. **Steady herschel–bulkley fluid flow in three-dimensional expansions.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 100(1):77–96, 2001. 2
- [2] BALMFORTH, N. J.; FRIGAARD, I. A. ; WORSTER, G.. **Viscoplastic flow over an inclined surface.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 84:65–81, 1999. 2
- [3] BITTLESTON, S. H.; FERGUSON, J. ; FRIGAARD, I. A.. **Mud removal and cement placement during primary cementing of an oil well laminar non-newtonian displacements in an eccentric annular hele-shaw cell.** Technical report, 2002. 2
- [4] BIZHANI, M.; FOOLAD, Y. ; FRIGAARD, I.. **Turbulent displacement flow of viscoplastic fluids in eccentric annulus: Experiments.** Physics of Fluids, 32(4), 2020. 2
- [5] BIZHANI, M.; FOOLAD, Y. ; FRIGAARD, I. A.. **Turbulent displacement flow of viscoplastic fluids in eccentric annulus: Experiments.** Physics of Fluids, 32(4):045117, 04 2020. 2
- [6] BIZHANI, M.; FRIGAARD, I. A.. **Buoyancy effects on turbulent displacement of viscoplastic fluids from strongly eccentric horizontal annuli.** Physics of Fluids, 32(12):125112, 12 2020. 2
- [7] COCHRANE, T.; WALTERS, K. ; WEBSTER, M.. **On newtonian and non-newtonian flow in complex geometries.** Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 301(1460):163–181, 07 1981. 2
- [8] COSTA, C. M.. **Análise e aperfeiçoamento de viscosímetro rotacional de campo através da reologia de fluidos de perfuração.** PhD thesis, PUC-Rio, 2021. 3.3.2.1, 3.4.3.1
- [9] ESCUDIER, M. P.; OLIVEIRA, P. J. ; PINHO, F. T.. **Modelling of annular flow in oil wells using non-newtonian fluids.** International Journal of Multiphase Flow, 28(1):67–99, 2002. 2

- [10] ESPINOZA, P. J. T.. **Deslocamento de fluidos complexos em espaços anulares irregulares.** PhD thesis, PUC-Rio, 2020. 3.2.1, 4.2.1.3, 4.2.3.3
- [11] ESPINOZA, P. J. T.; VARGES, P. R.; RODRIGUES, E. C.; NACCACHE, M. F. ; DE SOUZA MENDES, P. R.. **Displacement flow of yield stress materials in annular spaces of variable cross section.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 208:109614, 2022. 2
- [12] ETRATI, A.; ROUSTAEI, A. ; FRIGAARD, I.. **Strategies for mud-removal from washouts during cementing of vertical surface casing.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 195:107454, 2020. 2
- [13] ETRATI, A.; ROUSTAEI, A. ; FRIGAARD, I.. **Strategies for mud-removal from washouts during cementing of vertical surface casing.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 195:107454, 2020. 2
- [14] FANN INSTRUMENT COMPANY. **FANN 35 Instruction Manual.** Houston, Texas, 2016. 4.1.3
- [15] FOUNARGIOTAKIS, K.; KELESSIDIS, V. ; MAGLIONE, R.. **Laminar, transitional and turbulent flow of herschel–bulkley fluids in concentric annulus.** The canadian journal of chemical engineering, 86(4):676–683, 2008. 2
- [16] HAMMAD, K. J.; VRADIS, G. C.. **Creeping flow of a bingham plastic through axisymmetric sudden contractions with viscous dissipation.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 39(8):1555–1567, 1996. 2
- [17] HAMMAD, K. J.. **The effect of hydrodynamic conditions on heat transfer in a complex viscoplastic flow field.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 43(6):945–962, 2000. 2
- [18] HANACHI, N.; MALEKI, A. ; FRIGAARD, I.. **A model for foamed cementing of oil and gas wells.** Journal of Engineering Mathematics, 113(1):93–121, 2018. 2
- [19] Primary Cementing: The Mud Displacement Process, volumen SPE Annual Technical Conference and Exhibition de SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 09 1979. 2

- [20] HERMANY, L.; DOS SANTOS, D. D.; FREY, S.; NACCACHE, M. F. ; DE SOUZA MENDES, P. R.. **Flow of yield-stress liquids through an axisymmetric abrupt expansion-contraction.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 201:1–9, 2013. 2
- [21] JAY, P.; MAGNIN, A. ; PIAU, J. M.. **Viscoplastic fluid flow through a sudden axisymmetric expansion.** AIChE Journal, 47:2155–2166, 2001. 2
- [22] ASME. **Experimental Study of Newtonian Laminar Annular Horizontal Displacement Flows With Rotating Inner Cylinder,** volumen Volume 10: Petroleum Technology de International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 06 2022. 2
- [23] JUNG, H.; FRIGAARD, I.. **Displacement flows in eccentric annuli with a rotating inner cylinder.** Physics of Fluids, 34(5), 2022. 2
- [24] KELESSIDIS, V.; MAGLIONE, R.; TSAMANTAKI, C. ; ASPIRTAKIS, Y.. **Optimal determination of rheological parameters for herschel–bulkley drilling fluids and impact on pressure drop, velocity profiles and penetration rates during drilling.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 53(3):203–224, 2006. 2
- [25] LUND, B.; YTREHUS, J. D.; TAGHIPOUR, A.; DIVYANKAR, S. ; SAASEN, A.. **Fluid-fluid displacement for primary cementing in deviated washout sections.** In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, volumen 51296, p. V008T11A040. American Society of Mechanical Engineers, 2018. 2
- [26] LUND, B.; TAGHIPOUR, A.; YTREHUS, J. D. ; SAASEN, A.. **Experimental methods for investigation of drilling fluid displacement in irregular annuli.** Energies, 13(19):5201, 2020. 2
- [27] MAGLIONE, R.; GALLINO, G.; ROBOTTI, G.; ROMAGNOLI, R. ; ROMMETVEIT, R.. **A drilling well as viscometer: Studying the effects of well pressure and temperature on the rheology of the drilling fluids.** European Petroleum Conference:SPE-36885-MS, 10 1996. 2
- [28] MALEKMOHAMMADI, S.; CARRASCO-TEJA, M.; STOREY, S.; FRIGAARD, I. ; MARTINEZ, D.. **An experimental study of laminar**

- displacement flows in narrow vertical eccentric annuli.** Journal of fluid mechanics, 649:371–398, 2010. 2
- [29] MCLEAN, R.; MANRY, C. ; WHITAKER, W.. **Displacement mechanics in primary cementing.** Journal of Petroleum Technology, 19(02):251–260, 02 1967. 2
- [30] MITSOULIS, E.; HUILGOL, R.. **Entry flows of bingham plastics in expansions.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 122(1):45–54, 2004. XIIIth International Workshop on Numerical Methods for Non-Newtonian Flows. 2
- [31] NACCACHE, M. F.; BARBOSA, R. S.. **Creeping flow of viscoplastic materials through a planar expansion followed by a contraction.** Mechanics Research Communications, 34(5):423–431, 2007. 2
- [32] NACCACHE, M. F.; PINTO, H. A. M. ; ABDU, A.. **Flow displacement in eroded regions inside annular ducts.** Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 40, 9 2018. 2
- [33] NASSAR, B.; DE SOUZA MENDES, P. R. ; NACCACHE, M. F.. **Flow of elasto-viscoplastic liquids through an axisymmetric expansion–contraction.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 166(7):386–394, 2011. 2
- [34] OZBAYOGLU, M. E.; OMURLU, C.. **Comparative study of yield-power law drilling fluids flowing through annulus.** Petroleum Science and Technology, 25(8):1041–1052, 2007. 2
- [35] PELIPENKO, S.; FRIGAARD, I. A.. **Two-dimensional computational simulation of eccentric annular cementing displacements.** IMA Journal of Applied Mathematics, 69(6):557–583, 12 2004. 2
- [36] PUTZ, A. M.; BURGHELEA, T. I.. **The solid–fluid transition in a yield stress shear thinning physical gel.** IMA Journal of Applied Mathematics, 48(6):673–689, 07 2009. 2
- [37] **A New Model for Laminar, Transitional, and Turbulent Flow of Drilling Muds,** volumen SPE Production Operations Symposium de SPE Oklahoma City Oil and Gas Symposium / Production and Operations Symposium, 03 1993. 2
- [38] RENTERIA, A.; MALEKI, A.; FRIGAARD, I.; LUND, B.; TAGHIPOUR, A. ; YTREHUS, J. D.. **Displacement efficiency for primary**

- cementing of washout sections in highly deviated wells.** SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition:D012S033R001, 10 2018. 2
- [39] RENTERIA, A.; MALEKI, A.; FRIGAARD, I.; LUND, B.; TAGHIPOUR, A. ; YTREHUS, J.. **Effects of irregularity on displacement flows in primary cementing of highly deviated wells.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 172:662–680, 2019. 2
- [40] RENTERIA, A.; FRIGAARD, I.. **Horizontal cementing displacement flows of shear-thinning fluids, with and without casing rotation.** Geoenergy Science and Engineering, 226:211747, 2023. 2
- [41] ROUSTAEI, A.; FRIGAARD, I.. **The occurrence of fouling layers in the flow of a yield stress fluid along a wavy-walled channel.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 198:109–124, 2013. 2
- [42] ROUSTAEI, A.; GOSELIN, A. ; FRIGAARD, I.. **Residual drilling mud during conditioning of uneven boreholes in primary cementing. part 1: Rheology and geometry effects in non-inertial flows.** Journal of Non-Newtonian fluid mechanics, 220:87–98, 2015. 2
- [43] ROUSTAEI, A.; FRIGAARD, I.. **Residual drilling mud during conditioning of uneven boreholes in primary cementing. part 2: Steady laminar inertial flows.** Journal of Non-Newtonian fluid mechanics, 226:1–15, 2015. 2
- [44] DOS SANTOS, D. D. O.; FREY, S. L.; NACCACHE, M. F. ; DE SOUZA MENDES, P. R.. **Flow of elasto-viscoplastic liquids through a planar expansion-contraction.** Rheologica Acta, 53:31–41, 1 2014. 2
- [45] SCOTT, P.; MIRZA, F. ; VLACHOPOULOS, J.. **A finite element analysis of laminar flows through planar and axisymmetric abrupt expansions.** Computers Fluids, 14(4):423–432, 1986. 2
- [46] SKADSEM, H. J.; KRAGSET, S.; LUND, B.; YTREHUS, J. D. ; TAGHIPOUR, A.. **Annular displacement in a highly inclined irregular wellbore: Experimental and three-dimensional numerical simulations.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 172:998–1013, 2019. 2
- [47] SKADSEM, H. J.; KRAGSET, S.; LUND, B.; YTREHUS, J. D. ; TAGHIPOUR, A.. **Annular displacement in a highly inclined irregular**

- wellbore: Experimental and three-dimensional numerical simulations.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 172:998–1013, 2019. 2
- [48] SOTOUDEH, S.; FRIGAARD, I. A.. **Computational study of newtonian laminar annular horizontal displacement flows with rotating inner cylinder.** Physics of Fluids, 36(8), 2024. 2
- [49] SOTOUDEH, S.; IZADI, M.; LUND, B.; YTREHUS, J. D.; TAGHIPOUR, A. ; FRIGAARD, I. A.. **Laminar annular displacement flows with rotating inner cylinder in large annuli.** Physics of Fluids, 37(2):023143, 02 2025. 2
- [50] TAGHAVI, S. M.; ALBA, K.; MOYERS-GONZALEZ, M. ; FRIGAARD, I. A.. **Incomplete fluid–fluid displacement of yield stress fluids in near-horizontal pipes: Experiments and theory.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 167-168:59–74, 1 2012. 2
- [51] TARDY, P.; BITTLESTON, S.. **A model for annular displacements of wellbore completion fluids involving casing movement.** Journal of Petroleum Science and Engineering, 126:105–123, 2015. 2
- [52] VARGES, P. R.. **Posicionamento de tampões em poços de petróleo: uma investigação de escoamentos de inversão por gravidade.** PhD thesis, PUC-Rio, 2017. 3.3.2.1, 3.4.4.2
- [53] R. VARGES, P.; M. COSTA, C.; S. FONSECA, B.; F. NACCACHE, M. ; DE SOUZA MENDES, P. R.. **Rheological characterization of carbopol® dispersions in water and in water/glycerol solutions.** Fluids, 4(1):3, 2019. 4.1.4.1, 4.2.2.2
- [54] VARGES, P.; FONSECA, B.; DE SOUZA MENDES, P.; NACCACHE, M. ; DE MIRANDA, C.. **Flow of yield stress materials through annular abrupt expansion–contractions.** Physics of Fluids, 32(8), 2020. 1, 2, 4.2.2.2
- [55] VARGES, P.; RODRIGUES, E.; MORAES, L.; DE SOUZA MENDES, P. ; NACCACHE, M.. **Flow instabilities in fluid displacement through enlarged regions in annular ducts.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 305:104834, 2022. 4.2.2.2
- [56] ZHANG, R.; FRIGAARD, I.. **Primary cementing of vertical wells: displacement and dispersion effects in narrow eccentric annuli.** Journal of Fluid Mechanics, 947:A32, 2022. 2

- [57] ZHANG, R.; FRIGAARD, I.. **Primary cementing of vertical wells: Displacement and dispersion effects in narrow eccentric annuli. part 2. flow behaviour and classification.** Journal of Fluid Mechanics, 972:A38, 2023. 2
- [58] DE SOUZA MENDES, P. R.; NACCACHE, M. F.; VARGES, P. R. ; MARCHESINI, F. H.. **Flow of viscoplastic liquids through axisymmetric expansions–contractions.** Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 142(1):207–217, 2007. Viscoplastic fluids: From theory to application. 2
- [59] MENDES, P. R. S.; DUTRA, E. S.. **Viscosity function for yield-stress liquids.** Applied Rheology, 14:296–302, 2004. 2