

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

HILTON MOULIN CALIMAN

**EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE FLUIDOS VISCOSOS ATRAVÉS DA  
INJEÇÃO DE FLUIDOS VISCOPLÁSTICOS EM TUBOS CAPILARES**

VITÓRIA  
2016

HILTON MOULIN CALIMAN

**EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE FLUIDOS VISCOSOS ATRAVÉS DA  
INJEÇÃO DE FLUIDOS VISCOPLÁSTICOS EM TUBOS CAPILARES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edson José Soares

Co-orientador: Prof. Dr. Roney Leon Thompson

VITÓRIA

2016

*“Nunca pare de questionar. A curiosidade tem sua própria razão de existir.”*

— Albert Einstein

# AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que sempre me iluminou e proporcionou tantas oportunidades e realizações em minha vida.

À minha família, que me deu incentivo e apoio, em especial minha mãe, Maria Christina Moulin, por compartilhar das minhas realizações e pelo amor incondicional. À minha companheira Maryane Costa Ribeiro Jerônimo, pela paciência, carinho e por me dar forças sempre que precisei.

Ao professor e orientador Edson José Soares, por compartilhar seu conhecimento, e pelo auxílio neste trabalho e durante todo o curso. Agradeço pela confiança e incentivo, assim como por sua disposição e preocupação com meu crescimento pessoal. Agradeço também ao professor Roney Leon Thompson por sua preciosa ajuda em diversos momentos deste trabalho.

Aos caros amigos e companheiros de laboratório, que tornaram esse período mais incrível e enriquecedor, que compartilharam comigo todos os momentos, e que sempre se mostraram dispostos a ajudar. Em especial agradeço ao grande amigo Alan Victor Ferreira Modolo pela amizade, parceria e contribuição imprescindível para a realização deste trabalho. Obrigado à todos pelas amizades valiosas que desejo cultivar para sempre.

Agradeço à Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) e à Petrobras, em especial ao programa PRH-29, pela bolsa de estudos e pela oportunidade de desenvolver este trabalho no Laboratório de Reologia da Universidade Federal do Espírito Santo.

# RESUMO

O deslocamento líquido-líquido em tubos capilares vem sendo constantemente estudado nas últimas décadas. Atualmente a compreensão deste tipo de problema é de grande relevância, uma vez que envolve aplicações na recuperação de petróleo e cimentação de poços. Neste trabalho estamos interessados em entender como a razão de viscosidades, o número de capilaridade e as propriedades não-newtonianas, particularmente a viscoplasticidade, afetam o perfil da gota de material injetado e a eficiência de recuperação do líquido inicialmente no tubo. Através de uma simples abordagem experimental, uma solução de material viscoplástico é usada para deslocar um líquido newtoniano em um tubo capilar. As imagens das interfaces são capturadas durante o teste. A partir das imagens obtém-se o formato das interfaces e a espessura de líquido deslocado que permanece aderido à parede do tubo em função dos parâmetros estudados. Através de um simples balanço de volume também é possível medir a eficiência de recuperação. Neste trabalho é mostrado que a eficiência de recuperação e a espessura da película de líquido que permanece aderida à parede não seguem a mesma tendência. Ainda, foram identificadas instabilidades ao longo do comprimento das gotas a partir do centro da gota até o ponto de injeção. Os resultados obtidos sugerem um limite na eficiência de recuperação para razões de viscosidades menores que 1. Finalmente, observa-se que a eficiência de recuperação do caso viscoplástico é maior do que o caso newtoniano equivalente, enquanto que a espessura da película de líquido que permanece aderida à parede do tubo é menor.

Palavras chave: deslocamento líquido-líquido; tubo capilar; eficiência de recuperação; material viscoplástico.

# ABSTRACT

The liquid-liquid displacement in capillary tubes has been constantly analyzed on the last decades. Currently, the comprehension of this kind of problem is of great relevance, as it involves several applications on oil recovery and on cementing of oil wells. In the present work we are interested in understanding how the viscosity ratio, capillary number and the non-newtonian properties, viscoplasticity in particular, affects the profile of the drop of the displacing liquid and the displacement efficiency. In a simple experimental apparatus, a viscoplastic solution is used to displace a Newtonian liquid in a capillary tube. The images of the interface are recorded during the test. From these images, we have the interface shape and the thickness of the displaced liquid attached to the wall as a function of the investigated parameters. By a simple volume balance, we also have a measure of the displacement efficiency. It is shown that the displacement efficiency and the liquid film attached to the wall doesn't follow the same trend. In addition, instabilities were found along the length of the drops from the center to the injection point. Results indicates a limitation on the displacement efficiency regarding viscosity ratios less than 1. Finally, it is also observed that the displacement efficiency is greater than the equivalent Newtonian case, while the thickness of the displaced liquid attached to the wall is smaller.

Keywords: liquid-liquid displacement; capillary tube; displacement efficiency; viscoplastic material.

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Representação esquemática do processo de cimentação de poços de petróleo. . . . .	16
1.2	Representação esquemática do processo de recuperação de petróleo nas rochas reservatório. . . . .	17
1.3	Representação esquemática do problema. . . . .	27
2.1	Representação esquemática do problema. . . . .	29
2.2	Representação esquemática do deslocamento líquido-líquido. . . . .	33
3.1	Representação esquemática de um viscosímetro do tipo Cannon-Fenske. . . . .	37
3.2	Representação esquemática de um picnômetro. . . . .	38
3.3	Representação esquemática do processo de medição da tensão interfacial. . . . .	39
3.4	Acompanhamento da subida do anel durante a medição de tensão interfacial. Comparação dos casos newtoniano e viscoplástico. . . . .	41
3.5	<i>Flow curve</i> da solução viscolástica e a curva do modelo SMD utilizado para caracterizá-la. . . . .	41
3.6	Representação esquemática da configuração de placas paralelas em um reômetro. . . . .	42
3.7	Representação esquemática da bancada experimental utilizada. . . . .	43
3.8	Representação esquemática do sistema de lavagem dos tubos capilares. . . . .	45
4.1	Comparação dos resultados obtidos por Taylor e os resultados obtidos neste trabalho para $N_{\mu} = 400$ . . . . .	47
4.2	Comparação entre resultados numéricos e experimentais para $N_{\mu} = 4$ . . . . .	48
4.3	Comparação entre resultados numéricos e experimentais para $N_{\mu} = 2$ . . . . .	49

4.4	Fração de massa depositada na parede do tubo em função do número de capilaridade e razão de viscosidades. . . . .	50
4.5	Razão entre os resultados viscoplásticos e newtoniano em função do número de plasticidade. . . . .	52
4.6	Comparação entre as frentes das gotas para valores de $Ca$ e $N_{\mu}$ . . . . .	54
4.7	Estrutura da gota em diversos $Ca$ para $N_{\mu} = 4$ . . . . .	54
4.8	Estrutura da gota em diversos $Ca$ para $N_{\mu} = 2$ . . . . .	55
4.9	Estrutura da gota em diversos $Ca$ para $N_{\mu} = 1$ . . . . .	55
4.10	Estrutura da gota em diversos $Ca$ para $N_{\mu} = 0,5$ . . . . .	56
4.11	Estrutura da gota em diversos $Ca$ e $N_{\mu}$ no caso viscoplástico. . . . .	56
4.12	Comparação entre a estrutura da gota no caso newtoniano e no caso viscoplástico para $N_{\mu} = 2$ . . . . .	57
4.13	Comparação entre a estrutura da gota no caso newtoniano e no caso viscoplástico para $N_{\mu} = 1$ . . . . .	58
4.14	Comparação entre a estrutura da gota no caso newtoniano e no caso viscoplástico para $N_{\mu} = 0,5$ . . . . .	58
4.15	Contração abrupta das gotas para $N_{\mu} = 1$ e $N_{\mu} = 0,5$ . . . . .	59
4.16	Acompanhamento do escoamento da gota no meio do tubo, evidenciando a propagação das quebras ao longo da gota para $N_{\mu} = 0,5$ . . . . .	60



# LISTA DE TABELAS

3.1	Propriedades das soluções à base de água. . . . .	38
3.2	Propriedades das soluções à base de óleo. . . . .	38
3.3	Propriedades provenientes das interações das soluções à base de água e de óleo. . . . .	40
3.4	Caracterização da solução viscopástica . . . . .	42
3.5	Propriedades provenientes da interação entre a solução viscopástica e o óleo de mamona. . . . .	43
4.1	Coeficientes dos modelos matemáticos utilizados nas curvas $m \times Ca$ . .	51
4.2	Resultados Viscoplasticos em Comparação com Newtonianos . . . . .	52

# NOMENCLATURA

$m$ : fração de massa depositada na parede do tubo

$U$ : velocidade da bolha (m/s)

$U_m$ : velocidade média do fluido à frente da bolha (m/s)

$\sigma$ : tensão superficial ou interfacial (N/m)

$\mu$ : viscosidade newtoniana (Pa.s)

$Ca$ : número de capilaridade

$N_\mu$ : razão de viscosidades newtonianas

$Re$ : número de Reynolds

$\tau$ : tensão de cisalhamento (Pa)

$\tau_0$ : tensão limite de escoamento (Pa)

$\dot{\gamma}$ : taxa de cisalhamento (1/s)

$K$ : índice de consistência (Pa.s<sup>n</sup>)

$n$ : índice *power-law*

$\eta$ : viscosidade (Pa.s)

$c$ : constante de regularização da curva

$\eta_0$ : viscosidade quando  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$

$m_g$ : fração geométrica de massa depositada

$m_e$ : fração de massa perdida

$R_b$ : raio da bolha (m)

$R_0$ : raio do tubo (m)

$U_b$ : velocidade característica (m/s)

$\nabla$ : nabla

$\mathbf{u}$ : velocidade do fluido (m/s)

$\mathbf{T}$ : tensor das tensões

$p$ : pressão do fluido (Pa)

$\mathbf{1}$ : tensor unidade

$\mathbf{T}^E$ : parte viscosa do tensor das tensões

$\mathbf{D}$ : parte simétrica do gradiente de velocidades

$N_\eta$ : razão de viscosidades

$Pl$ : número de plasticidade

$\mathbf{t}$ : vetor tangente

$\mathbf{n}$ : vetor normal

$R_m$ : raio médio de curvatura (m)

$\rho$ : massa específica ( $\text{kg/m}^3$ )

$\Delta x$ : comprimento do cilindro (m)

$T_{\text{amb}}$ : temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )

$F_{\text{max}}$ : força máxima registrada durante o rompimento da interface (N)

$C$ : circunferência do anel (m)

$N_p$ : razão de massas específicas

$m_e^n$ : fração de massa perdida newtoniana

$m_e^p$ : fração de massa perdida viscoplástica

$m_g^n$ : fração geométrica de massa depositada newtoniana

$m_g^p$ : fração geométrica de massa depositada viscoplástica

# SUMÁRIO

<b>RESUMO</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>vii</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>ix</b>
<b>NOMENCLATURA</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1 Motivação . . . . .	15
1.2 Estado da Arte . . . . .	17
1.3 Caracterização do Problema . . . . .	26
1.4 Objetivos . . . . .	27
<b>2 FORMULAÇÃO FÍSICA</b>	<b>29</b>
2.1 Análise Dimensional . . . . .	29
2.2 Análise da Fração Mássica . . . . .	32
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>35</b>
3.1 Seleção dos Fluidos . . . . .	35
3.2 Preparo e Caracterização dos Fluidos . . . . .	36
3.2.1 Soluções Newtonianas . . . . .	36
3.2.2 Solução Viscoplastica . . . . .	39
3.3 Abordagem Experimental . . . . .	43

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
4.1	Resultados Preliminares . . . . .	46
4.2	Análise Newtoniana . . . . .	49
4.3	O Caso Viscoplastico . . . . .	50
4.4	Análise de imagens . . . . .	53
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>63</b>

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Motivação

O deslocamento de um líquido através da injeção de um fluido em um tubo capilar é um problema frequentemente observado em um grande número de aplicações. Esta classe de problemas é importante nos estudos de recuperação de óleo em meios porosos, no processo de revestimento de poços, e também em estudos biológicos, como os que envolvem o deslocamento de mucos em vias pulmonares.

Em especial, as aplicações na indústria do petróleo tem recebido maior destaque recentemente, como no processo de revestimento de poços de petróleo. Após a perfuração de um poço, são inseridas seções de tubos de aço (tubos de revestimento) com diâmetro levemente menor que o diâmetro do poço. Em seguida é necessário revestir o espaço entre os tubos e o poço para garantir a integridade estrutural. Nesse sentido, cimento é injetado através do interior dos tubos de revestimento e retorna através do espaço anular entre os tubos e o poço, empurrando o máximo possível de lama de perfuração para que a espessura da camada de cimento seja a maior possível. Esse deslocamento da lama pelo cimento no espaço anular pode ser comparado com o deslocamento de um fluido por um outro no interior de um tubo capilar, conforme ilustra a Figura 1.1.

Ainda, o processo de recuperação do petróleo do interior das rochas reservatórios também tem relação com o problema estudado. O petróleo é resultado de milhares de

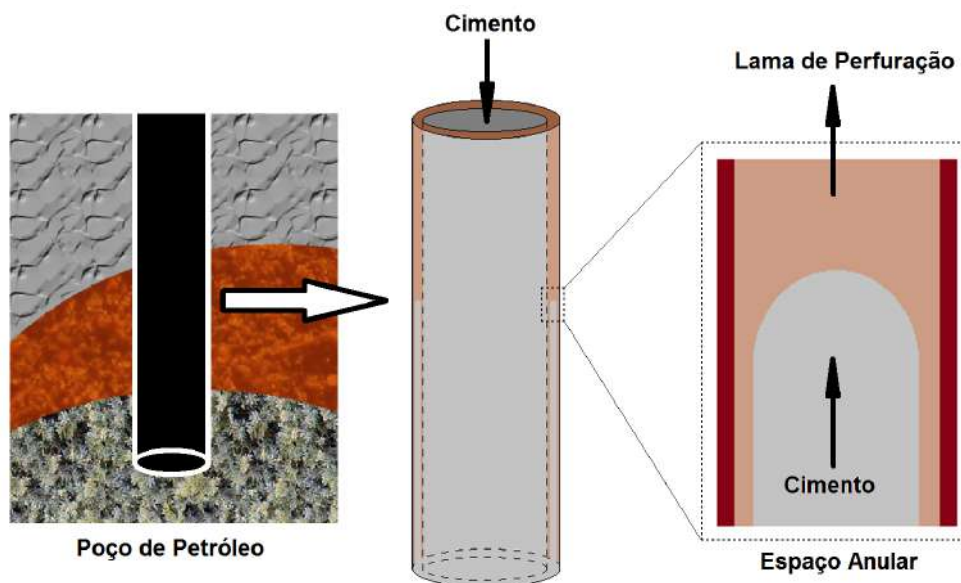


Figura 1.1: Representação esquemática do processo de cimentação de poços de petróleo.

anos de decomposição de matéria orgânica aprisionada em formações rochosas à determinadas condições físico-químicas. Em seguida o petróleo migra e se acumula em rochas reservatórios, que são porosas e permeáveis e apresentam vazios e fissuras interligados que propiciam a circulação de hidrocarbonetos.

Um processo típico de recuperação consiste na injeção de um fluido na rocha reservatório para que este desloque o petróleo armazenado em seu interior. Esta condição onde um fluido desloca o petróleo através dos vazios e poros interligados no interior das rochas reservatórios pode ser modelada como o deslocamento de um fluido por outro no interior de um tubo capilar, conforme ilustrado pela Figura 1.2.

No entanto sabemos que esta recuperação não é perfeita, principalmente quando a rocha é molhada mais ao óleo, isto é, uma parcela do petróleo inicialmente armazenado nos reservatórios é perdida, o que vem a ser um grande desperdício tendo em vista a grande demanda pelo combustível atualmente. Dessa forma, visando realizar a recuperação da forma mais eficiente possível, é de extrema importância a compreensão completa do problema.



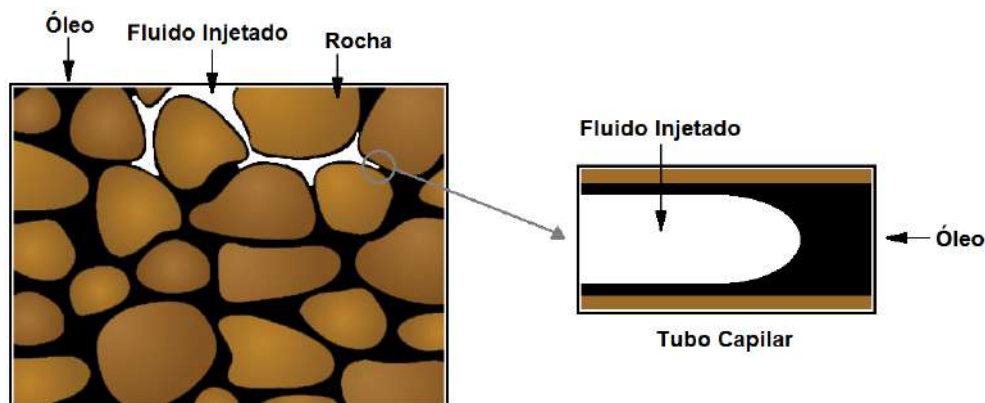


Figura 1.2: Representação esquemática do processo de recuperação de petróleo nas rochas reservatório.

## 1.2 Estado da Arte

O deslocamento de um fluido viscoso em um tubo capilar foi estudado pioneiramente por Fairbrother e Stubbs [12], onde ar era injetado em uma extremidade do tubo, deslocando o fluido contido em seu interior. O trabalho tinha como objetivo determinar se a bolha de ar desenvolvida em um tubo capilar, promovendo o escoamento do fluido à sua frente, era de fato um índice da velocidade deste escoamento. A fração  $m$  de fluido que permanecia depositada à parede do tubo era então medida. Sendo  $U$  a velocidade da bolha de ar e  $U_m$  a velocidade média do fluido à frente desta, um balanço de volume mostra que  $m$  pode ser descrito da seguinte forma:

$$m = \frac{U - U_m}{U} \quad (1.1)$$

Durantes seus experimentos, os autores se limitaram ao caso onde  $m$  é pequeno, e para tal, encontraram

$$m = \sqrt{\frac{\mu U}{\sigma}} = \sqrt{Ca} \quad (1.2)$$

Onde  $Ca$  é o número de capilaridade,  $U$  é a velocidade da frente da bolha,  $\mu$  é a viscosidade do líquido e  $\sigma$  é a tensão superficial.

Bretherton [3] continuou os trabalhos de [12], realizando estudos teóricos e experimentais onde um fluido viscoso era deslocado por uma longa bolha de ar. O autor trouxe duas abordagens para o problema: o caso onde o raio do tubo era suficientemente pequeno para que fosse possível desprezar os esforços gravitacionais; e o caso do escoamento em tubos verticais. Os autores propõem uma equação teórica para  $m$  para baixos valores de número de capilaridade que concordam com os dados obtidos por [12].

Taylor [28] reproduziu os experimentos descritos anteriormente e mostrou que a aproximação obtida por [12] é válida apenas para valores de  $Ca$  até 0,09. Além disso, o autor estendeu os experimentos utilizando fluidos muito viscosos, atingindo valores de até 1,9 para o número de capilaridade, onde encontrou  $m$  igual a 0,55. Taylor ainda observou que a tendência aparente da curva sugeria que  $m$  se aproximava de um valor assintótico neste caso, indicando que ao tentar extrair um fluido muito viscoso de um tubo, mais da metade seria perdida quando a coluna de ar atingisse a extremidade oposta do tubo. Ainda, o autor propôs regimes de escoamento no interior do tubo que dependiam do valor de  $m$ .

Cox [5] também abordou o mesmo problema com o intuito de estudar o comportamento de  $m$  para altos valores de  $Ca$  e observou que quando este se aproximava de 10, a fração de massa depositada na parede do tubo era de 0,6.

Feng [13] desenvolveu um estudo numérico do deslocamento gás-líquido newtoniano. O autor abordou uma faixa de  $Ca$  mais ampla que a estudada por [3] obtendo resultados que vão ao encontro dos diversos trabalhos disponíveis na literatura. Ainda, a influência do número de Reynolds e do número de capilaridade na quantidade de massa depositada na parede do tubo foi avaliada. Por fim, o autor propôs uma relação empírica para o cálculo de  $m$ .

Soares et al. [25] fizeram simulações numéricas para determinar a espessura da película de líquido que permanecia aderida ao tubo capilar após o deslocamento por um gás. Os autores utilizaram um modelo de líquido newtoniano generalizado sim-

ples com uma função de viscosidade *power-law*. A influência do número de Reynolds no caso do deslocamento de um líquido por um gás foi analisada e os resultados indicaram que para valores de  $Re$  até 1, o comportamento é equivalente à inércia desprezível. Os autores notaram que o comportamento afinante do fluido resulta em uma película mais fina em toda faixa de capilaridade em comparação com o caso newtoniano. Essa tendência também foi observada por Kamisli e Ryan [19] em 1999.

Souza Mendes et al. [7] também estudaram o deslocamento de um líquido por um gás, no entanto o trabalho foi experimental e utilizaram um líquido viscoplástico. Os autores notaram que em baixas vazões a película de líquido que restava era menor com interfaces mais retas quando comparado a maiores vazões. Além disso, observou-se que a espessura da película restante era maior nos líquidos com maiores concentrações de Carbopol. Ainda, para cada líquido estudado existe um valor crítico de velocidade média abaixo do qual o escoamento é perfeito, ou seja, não resta película de líquido aderida ao tubo ( $m = 0$ ).

Dimakopoulos e Tsamopoulos [11] realizaram um estudo numérico do deslocamento de fluidos newtonianos e viscoplásticos através da injeção de ar em tubos com geometrias complexas em regime transiente. O trabalho foi uma continuação dos estudos realizados pelos mesmos autores a respeito do deslocamento de fluidos newtonianos [9] e viscoplásticos [10] em contrações de tubos cilíndricos. Os autores notaram que os efeitos viscoplásticos tendem a retardar a penetração do gás e aplainar a frente de bolha, reduzindo a espessura da camada de fluido depositada. Também foi observado que para elevados valores de número de Reynolds os efeitos de inércia apresentam grande relevância no sentido de reduzir  $m$ , sobretudo em escoamentos de fluidos newtonianos.

Sousa et al. [6] fizeram uma investigação numérica do deslocamento de líquidos afinantes e viscoplásticos por um gás em tubos capilares. Nos dois materiais estudados a espessura da película aderida à parede do tubo diminuiu ao se afastar do caso newtoniano. Dessa forma, os autores concluíram que o deslocamento de líquidos pseudoplásticos e viscoplásticos são mais eficientes do que o deslocamento de líquidos

newtonianos.

Goldsmith e Mason [16] também reproduziram o experimento, no entanto, o líquido contido no interior do tubo era deslocado por outro líquido, e não por um gás. A espessura da película de líquido ao redor da gota e os perfis de velocidade foram determinados através da observação direta em um microscópio. Os resultados obtidos se mostraram de acordo com [12]. Para altos valores de velocidade da gota, foram observadas reentrâncias na frente da gota que penetravam em seu interior. Além disso, ao manter as gotas estacionárias após o teste ser finalizado, notou-se que as extremidades da gota iniciavam um processo de quebra que se propagava para dentro ao longo do corpo da mesma. Ainda, os autores observaram que a espessura da película de filme que permanecia aderida à parede do tubo aumentava à medida que a velocidade da gota aumentava.

Apesar do problema aqui em questão ter sido continuamente estudado por décadas, ainda existem vários aspectos de grande importância ainda inexplorados. Estudos mais recentes trazem abordagens mais elaboradas para o problema, através de simulações numéricas e análises de fluidos mais complexos.

Cachile et al. [4] mediram o perfil de espessura da camada residual do deslocamento de fluidos imiscíveis em tubos capilares. Eles demonstraram experimentalmente que a suposição da existência de uma espessura constante é válida somente para baixas razões de viscosidades e/ou pequenos valores de números de capilaridades. De outra maneira a espessura diminui à medida que se distancia da frente da gota.

Hodges et al. [17] estenderam o trabalho de [3] e avaliaram os efeitos da razão de viscosidades e número de capilaridade sobre a espessura da camada de fluido deslocado para pequenos valores de  $Ca$ . Os autores estudaram longas gotas de fluidos viscosos injetadas em outro fluido, imiscível ao anterior. Foi observado que a espessura da camada de fluido depositada aumenta por um fator de  $4^{2/3}$  até um valor constante, onde  $Ca^{-1/3} \ll N_{\mu} \ll Ca^{2/3}$  e em seguida decresce por um fator de  $2^{2/3}$  quando  $N_{\mu}$  tende ao infinito.

Soares et al. [22] fizeram uma análise teórica, numérica e experimental do deslocamento de um líquido por outro líquido em um tubo capilar e mostraram que somente no caso onde a viscosidade do fluido deslocador for significativamente pequena que a fração de massa depositada na parede do tubo pode ser avaliada pela Eq. 1.1. Os autores realizaram testes experimentais e numéricos onde avaliaram a espessura da película de fluido que permanecia aderida à parede do tubo em função de  $Ca$  e  $N_\mu$ . Foi observado que os testes numéricos e experimentais com  $N_\mu = 1000$  e  $N_\mu = 20$ , respectivamente, apresentaram resultados de acordo com os de Taylor [28], mostrando que o caso de um deslocamento líquido-líquido com  $N_\mu = 20$  já é suficiente para reproduzir o caso gás-líquido. Ainda, os autores fizeram testes numéricos e experimentais com  $N_\mu = 12;4;2$  e observaram que a espessura da película aumentava com o aumento de  $Ca$  e com a diminuição de  $N_\mu$ .

Vanaparthi e Meiburg [30] estudaram o deslocamento de fluidos newtonianos miscíveis e avaliaram a influência da razão de viscosidades e do número de Péclet e da gravidade sobre os escoamentos. Os autores observaram que maiores valores de razão de viscosidade tendem a resultar em uma maior velocidade e o oposto foi observado com valores moderados de número de Péclet.

Soares e Thompson [23] realizaram uma análise numérica e teórica a respeito do deslocamento de um líquido por outro líquido imiscível no anterior em tubos capilares. Foi observado que a razão de viscosidades igual a 2 divide o problema em dois. Nos casos onde  $N_\mu$  era inferior a 2, nem todos os regimes de escoamento previstos por Taylor [28] são possíveis. Foram feitas simulações numéricas para  $N_\mu = 2;4;8;400$  em uma ampla faixa de capilaridades com o intuito de avaliar a espessura da película de líquido aderida à parede do tubo após o deslocamento. Os autores notaram que a película aumentava com a diminuição da razão de viscosidades. Os resultados obtidos pelos autores são parcialmente comparados com os resultados encontrados no presente trabalho, na Seção 4.1.

Lac e Sherwood [20] analisaram numericamente o problema do escoamento sob pressão

de uma gota de um fluido no interior de outro fluido, avaliando não apenas a razão de viscosidades e número de capilaridade, mas também o tamanho da gota. Os autores fizeram observações importantes a respeito de como a estrutura da gota é afetada pelas condições de escoamento e parâmetros dos fluidos.

Recentemente, Soares et al. [24] trouxeram uma nova abordagem para o problema. Os autores observaram que em um deslocamento de um líquido por outro líquido imiscível no anterior em um tubo capilar, a fração mássica que é deslocada para fora do tubo não é o complemento da fração mássica que permanece aderida à parede. Isso ocorre porque parte da massa recuperada é arrastada para fora. Dessa forma os autores propuseram dois parâmetros para investigar o problema: a fração geométrica de massa depositada,  $m_g$ , e a fração de massa perdida,  $m_e$ . O primeiro parâmetro é o mesmo investigado anteriormente na literatura e representa a espessura da película do fluido deslocado que permanece aderida à parede do tubo. O segundo representa a eficiência de recuperação do fluido deslocado em relação à quantidade inicial de massa dentro do tubo. Os autores observaram que ao aumentar a razão de viscosidades, a espessura da película aderida ao tubo aumentava, mas a eficiência de recuperação também aumentava. Isso significa que ao aumentar a viscosidade do fluido injetado a recuperação também aumenta, devido ao arraste, mesmo que a película restante seja mais espessa.

Huzyak e Koelling [18] exploraram experimentalmente o deslocamento de materiais newtonianos e viscoelásticos através da injeção de gás em tubo capilares. Em sua análise newtoniana, os autores obtiveram resultados coerentes com os obtidos por [28] e no que diz respeito ao caso viscoelástico, observaram que os resultados se aproximavam do caso newtoniano para baixos valores de  $Ca$  porém é possível notar os efeitos viscoelásticos para altos valores do número de capilaridade. Esses efeitos se traduzem em um valor maior de  $m$  em comparação ao caso newtoniano equivalente.

Soares et al. [26] apresentaram uma continuação do trabalho descrito em Soares et al. [22], onde são estudados deslocamentos de fluidos newtonianos e viscoelásticos. Os autores comparam dados de massa perdida e a geometria da interface em função do

número de capilaridade e de característica viscoelásticas. Foi observado pelos autores que o valor de  $m$  para o fluido com menor concentração de material viscoplástico teve um comportamento próximo do newtoniano em baixos valores de  $Ca$ , onde os efeitos de capilaridade tendem a ser predominantes. Para o fluido com solução de material viscoelástico mais concentrada o comportamento foi consideravelmente distinto para a mesma faixa de número de capilaridade, apresentando valores de  $m$  superiores ao deslocamento de fluido newtoniano.

Taghavi et al. [27] apresentaram resultados de um estudo experimental do deslocamento de fluidos viscoplásticos por fluidos newtonianos de alta viscosidade miscíveis ao anterior em tubos longos com inclinação próxima à horizontal. Os autores demonstraram interesse no caso em que a tensão limite de escoamento é significativamente maior que as tensões viscosas típicas no fluido deslocador e onde os efeitos de empuxo são relevantes. Nos casos onde o deslocamento da gota ocorre no centro do tubo, foram observadas camadas residuais não-uniformes ao longo do tubo. Já na situação onde a gota se desloca pelo fundo do tubo, foram identificadas duas frentes de propagação: uma mais rápida que se desloca em uma camada fina próxima ao fundo do tubo e outra, mais lenta, deslocando-se em uma camada mais espessa do tubo.

Allouche et al. [1] estudaram numericamente o deslocamento de um líquido viscoplástico por outro também viscoplástico miscível ao anterior em regime transiente entre placas paralelas. Os autores observaram que o valor de  $m$  decresce com o aumento da plasticidade do fluido deslocado. Ainda, evidenciaram a possibilidade de estimar a espessura máxima da camada residual de massa depositada nas paredes do canal. Também foi observado que a camada residual é melhor definida em escoamentos lentos, uma vez que a interface é desestabilizada em altas velocidades.

Evidentemente, qualquer análise teórica de parâmetros reológicos depende da escolha de um modelo constitutivo adequado. O primeiro modelo que descreve o comportamento de um fluido viscoplástico foi apresentado por Bingham [2]. Este modelo é conhecido como Modelo Plástico Ideal e seu comportamento é caracterizado pela Eq.

1.3:

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} & se \ \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & se \ \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1.3)$$

Este modelo no entanto possui determinadas limitações como o fato de ser representado por uma função com derivada descontínua e considerar viscosidade infinita em taxas de deformação próximas de zero. Em virtude dessas limitações, desde sua apresentação o modelo foi foco de muitas pesquisas no sentido de desenvolver modelos para fluidos viscoplásticos que melhor caracterizem este tipo de fluido.

A função Herschel-Bulkley talvez seja a função de viscosidade mais empregada para ajustar dados de viscosidade de materiais viscoplásticos. A função é apresentada pela Eq. 1.4 e utiliza três parâmetros reológicos: a tensão limite de escoamento,  $\tau_0$ , o índice de consistência,  $K$ , e o índice *power-law*,  $n$ .

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n & se \ \tau \geq \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & se \ \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1.4)$$

Sendo a função da viscosidade descrita por:

$$\begin{cases} \eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} & se \ \tau \geq \tau_0 \\ \eta \rightarrow \infty & se \ \tau < \tau_0 \end{cases} \quad (1.5)$$

Pode-se observar que quando  $n = 1$  a equação reproduz o modelo Plástico Ideal; enquanto que, se  $\tau_0 = 0$ , tem-se a função *power-law* e para  $n = 1$  e  $\tau_0 = 0$  tem-se um fluido newtoniano. Contudo, o modelo Herschel-Bulkley também possui derivadas descontínuas.

Como alternativa, Papanastasiou [21] propôs uma função regularizada com derivada contínua para descrever o modelo Herschel-Bulkley, e portanto, mais adequada para modelagem numérica. A Eq. 1.6 apresenta esta função, sendo  $c$  um parâmetro de regularização, que não possui sentido físico, mas que à medida que se aumenta seu valor se aproxima do comportamento da função de Herschel-Bulkley.



$$\tau = (1 - \exp(-c\dot{\gamma}))\tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (1.6)$$

Onde  $\tau_0$  é a tensão limite de escoamento,  $K$  é um índice de consistência,  $n$  é o índice *power-law* e  $c$  é uma constante de regularização da curva.

Mais recentemente, Souza Mendes e Dutra [8] apresentaram uma nova função de viscosidade para fluidos viscoplásticos. Nesta função, assim como na de [21], a intensidade da tensão de cisalhamento,  $\tau$ , é uma função da intensidade da taxa de deformação,  $\dot{\gamma}$ , possuindo derivada contínua e descrita pela Eq. 1.7.

$$\tau = (1 - \exp(-\eta_0\dot{\gamma}/\tau_0))(\tau_0 + K\dot{\gamma}^n) \quad (1.7)$$

Onde  $\eta_0$  é a viscosidade do fluido quando  $\tau < \tau_0$ . Como particularidade desta função, pode-se destacar que a mesma não prevê viscosidade infinita quando  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ , o que ocorre com as demais funções citadas anteriormente. Esta função é usada no presente trabalho para ajuste reológico do material viscoplástico usado em todos os testes. Percebe-se, como será mostrado, um bom ajuste do modelo SMD aos dados da caracterização reológica.

Thompson e Soares [29] apresentaram uma análise teórica a respeito dos números adimensionais de fluidos viscoplásticos. Os autores defendem que a tensão característica utilizada na adimensionalização deve ser definida como a intensidade da extra-tensão avaliada em uma taxa de deformação característica máxima. Esta definição proposta inclui a tensão limite de escoamento em todos os números adimensionais que tem relação com os efeitos viscosos, tais como o número de Reynolds e razão de viscosidades. Este procedimento mostra-se ser mais efetivo e proporciona uma comparação mais justa em relação ao caso newtoniano. Isso se deve ao fato de que efeitos viscosos mais significativos são levados em consideração concentrando os efeitos plásticos em um único parâmetro. O número de plasticidade,  $Pl$ , definido como a razão entre a tensão limite de escoamento e a tensão máxima encontrada, mostra-se como uma melhor opção no sentido de capturar os efeitos plásticos do que

o número de Bingham usual.

Freitas et al. [14] estudaram numericamente o deslocamento imiscível de um fluido newtoniano por um material viscoplástico entre placas paralelas, onde o fluido viscoplástico obedece a função proposta por [21]. Os autores investigaram o deslocamento em função dos parâmetros adimensionais que governam o problema: número de capilaridade, razão de viscosidades e número de plasticidade. Os resultados evidenciaram que para um valor fixo de razão de viscosidades, a fração de massa aderida à parede é uma função decrescente do número de plasticidade.

Freitas et al. [15] continuaram seu trabalho anterior [14] ao realizar desta vez um estudo numérico do deslocamento imiscível de uma fluido viscoplástico por outro também viscoplástico. Os autores evidenciaram que alterar o número de plasticidade do fluido deslocado causa um impacto maior do que alterar o do fluido deslocador. Ainda, foi observado que a transição de regimes de escoamento do deslocamento viscoplástico-viscoplástico é muito diferente das do deslocamento newtoniano-newtoniano.

O presente trabalho visa expandir a investigação do problema iniciada por Soares et al. [24], explorando menores razões de viscosidades para o caso newtoniano e também estudar a influência de um material viscoplástico na eficiência de recuperação. Tanto a fração de massa perdida quanto a fração geométrica de massa depositada são avaliadas.

### **1.3 Caracterização do Problema**

O problema estudado neste trabalho envolve o deslocamento de um líquido viscoso inicialmente no interior de um tubo capilar através da injeção de outro líquido viscoso, imiscível ao anterior. O primeiro é denominado fluido deslocado (ou Fluido 2) e o segundo, fluido deslocador (ou Fluido 1). Ao ser injetado por uma das extremidades o fluido 1 escoar no interior do tubo como uma gota semi-infinita de diâmetro menor que o diâmetro interno do tubo, empurrando e arrastando o fluido 2, que transborda na

extremidade oposta enquanto a gota avança e uma fração deste permanece aderida à parede do tubo. Uma representação esquemática é apresentada na Figura 1.3.

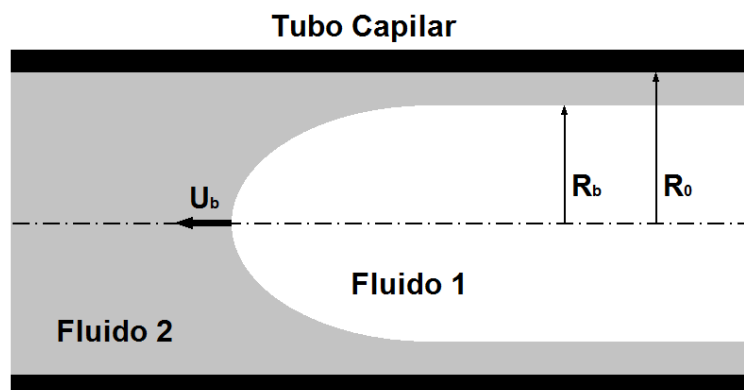


Figura 1.3: Representação esquemática do problema.

Conforme ilustrado na Figura 1.3 a fração geométrica de massa depositada,  $m_g$ , pode ser facilmente determinada através de uma avaliação da espessura de fluido 2 restante após a passagem da gota de fluido 1. Já a fração de massa perdida,  $m_e$ , pode ser determinada como sendo o complemento da razão de massa de fluido 1 recuperada na saída do tubo e a quantidade inicial de massa em seu interior.

Esses são os dois parâmetros de maior interesse ao se estudar o problema. Portanto é importante investigar os fatores que os influenciam. Ao consultar a literatura nos deparamos com diversos fatores que exercem influência nos parâmetros apresentados, no entanto alguns merecem destaque como: o número de capilaridade,  $Ca$ ; razão de viscosidades,  $N_\mu$ ; natureza dos fluidos; número de Reynolds,  $Re$ ; razão de massas específicas. Assim, avaliar como os parâmetros de interesse reagem à esses fatores contribui para a caracterização e nos ajuda a compreender melhor o problema.

## 1.4 Objetivos

Este trabalho apresenta uma abordagem experimental para o problema descrito e tem por objetivo principal investigar a influência de um material viscoplástico na eficiência

de recuperação quando comparado com o caso newtoniano. O material utilizado obedece a função SMD de viscosidade para líquidos viscoplásticos proposta por [8]. Além disso, deseja-se aprofundar o entendimento do efeito da razão de viscosidades,  $N_\mu$ , e do número de capilaridade,  $Ca$ , nos parâmetros de interesse do problema. O trabalho explora valores de  $N_\mu$  menores que um, ou seja, quando o fluido deslocador possui uma viscosidade maior que o deslocado. Ainda, uma análise de imagens do deslocamento é feita com o intuito de avaliar a influência dos fatores mencionados no formato da interface entre os fluidos.

## CAPÍTULO 2

# FORMULAÇÃO FÍSICA

Apresenta-se neste capítulo as equações que descrevem o fenômeno bem como uma análise dimensional, destacando-se os parâmetros adimensionais importantes.

### 2.1 Análise Dimensional

O esquema do problema analisado é ilustrado na Figura 2.1. O referencial usado é a frente da gota e, portanto, a parede do tubo se move à velocidade  $U_b$ . O tubo tem raio  $R_0$ . Na Região IV é assumido escoamento completamente desenvolvido à uma distância fixa da linha central do tubo,  $R_b$ . Com base nessas hipóteses o problema neste referencial é estável. É assumido que o escoamento é isotérmico, com inércia desprezível, e incompressível.

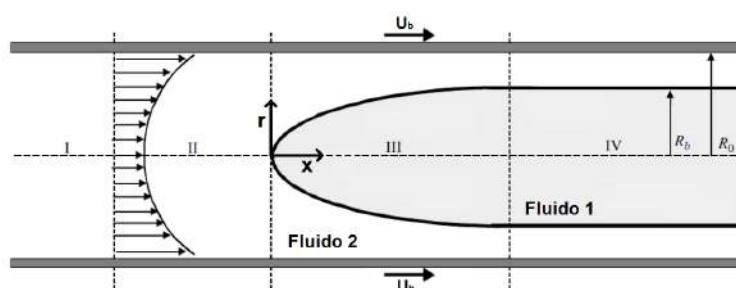


Figura 2.1: Representação esquemática do problema.

As equações governantes são aqui apresentadas em uma forma adimensional fazendo uso de velocidades e comprimentos característicos apropriados, a velocidade da parede do tubo,  $U_b$ , e o raio do tubo,  $R_0$ , respectivamente, juntamente com a tensão

característica,  $\mu_2 U_b / R_0$ , onde  $\mu_2$  é a viscosidade do fluido deslocado (newtoniano). A equação da conservação de massa é dada por:

$$\nabla^* \cdot \mathbf{u}_k^* = 0 \quad (2.1)$$

Enquanto que a equação de conservação do momento é dada por:

$$\nabla^* \cdot \mathbf{T}_k^* = -\nabla^* p_k^* + \nabla^* \cdot \mathbf{T}_k^{E*} = 0 \quad (2.2)$$

Onde os subscritos  $k = 1, 2$  indicam os dois fluidos considerados. Na Equação 2.1,  $\mathbf{u}_k^*$  é o vetor velocidade adimensional,  $\mathbf{u}_k = U_b \mathbf{u}_k^*$ , e na Equação 2.2,  $\mathbf{T}_k^* = -p_k^* \mathbf{1} + \mathbf{T}_k^{E*}$  é o tensor das tensões, onde  $p_k^*$  é a pressão adimensional,  $\mathbf{1}$  é o tensor unidade,  $\mathbf{T}_k^{E*} = 2\eta_k^* \mathbf{D}_k^*$  é parte viscosa do tensor das tensões, e  $\mathbf{D}_k$  é a parte simétrica do gradiente de velocidades. Como o fluido 1 obedece a função SMD de viscosidade para líquidos viscoplásticos e o fluido 2 é um fluido newtoniano, a Equação 2.2 toma a seguinte forma para o fluido 1 (deslocador):

$$-\nabla^* p_1^* + \frac{1}{N_\eta} \nabla^* \cdot \left\{ \left[ \frac{Pl}{\dot{\gamma}_1^*} + (1 - Pl) \dot{\gamma}_1^{*(n-1)} \right] [1 - \exp(-\eta_0 U_b \dot{\gamma}_1^* / \tau_0 R_0)] \right\} \mathbf{D}_1^* = 0 \quad (2.3)$$

E a seguinte forma para o fluido 2 (deslocado):

$$-\nabla^* p_2^* + \nabla^* \cdot \mathbf{D}_2^* = 0 \quad (2.4)$$

A grandeza  $\dot{\gamma}_1 \equiv \sqrt{(1/2) \text{tr}(\mathbf{D}_1^*)^2}$  é a intensidade do tensor taxa de deformação, e as grandezas adimensionais indicadas com o superescrito \* são dadas por:

$$\nabla^* \equiv R_0 \nabla; \quad p_k^* \equiv \frac{p_k R_0}{\mu_2 U_b}; \quad \eta_k^* \equiv \frac{\eta_k}{\mu_2}; \quad \dot{\gamma}_1^* \equiv \frac{\dot{\gamma}_1 R_0}{U_b}; \quad \mathbf{D}_k^* \equiv \frac{2R_0}{U_b} \mathbf{D}_k \quad (2.5)$$

Na Equação 2.3, vemos a presença da razão de viscosidades,  $N_\eta$ , e o número de plasticidade,  $Pl$ . Estes parâmetros foram calculados com base nos critérios propostos por

[29]. A viscosidade característica do fluido deslocador foi definida a partir da função de viscosidade Herschel-Bulkley avaliada à uma taxa de deformação característica  $U_b/R_0$ . Assim,  $N_\eta$  é dada por:

$$N_\eta = \frac{\mu_2}{\tau_0 \left(\frac{R_0}{U_b}\right) + K \left(\frac{U_b}{R_0}\right)^{n-1}} \quad (2.6)$$

E o número de plasticidade tem a seguinte expressão:

$$Pl = \frac{\tau_0}{\tau_0 + K \left(\frac{U_b}{R_0}\right)^n} \quad (2.7)$$

Nos casos onde o fluido deslocador é um fluido newtoniano, temos que  $n = 1$ ,  $\tau_0 = 0$  e  $K$  é a viscosidade newtoniana do fluido. Na interface líquido-líquido, não ocorre fluxo de massa através da interface. Essa condição pode ser traduzidas por:

$$\mathbf{u}_1^* = \mathbf{u}_2^* = (\mathbf{u}_k^* \cdot \mathbf{t}) \mathbf{t} \quad (2.8)$$

Onde  $\mathbf{t}$  é o vetor tangente. Além disso, ainda na interface líquido-líquido, a tração equilibra a pressão capilar:

$$\mathbf{n}(p_1^* - p_2^*) + \mathbf{n} \left\{ \mathbf{D}_2^* - \frac{1}{N_\eta} \left[ \left[ \frac{Pl}{\dot{\gamma}_1^*} + (1 - Pl) \dot{\gamma}_1^{*(n-1)} \right] [1 - \exp(-\eta_0 U \dot{\gamma}_1^* / \tau_0 R_0)] \right] \mathbf{D}_1^* \right\} = \frac{1}{Ca} \frac{1}{R_m^*} \mathbf{n} \quad (2.9)$$

Onde  $p_1^*$  e  $p_2^*$  são as pressões adimensionais nos fluidos 1 e 2, e o número de capilaridade,  $Ca$ , é dado por:

$$Ca = \frac{\mu_2 U_b}{\sigma} \quad (2.10)$$

Onde  $\sigma$  é a tensão interfacial líquido-líquido e  $R_m^* = R_m/R_0$  é raio de curvatura adimensional. A Equação 2.9 contém os números adimensionais que governam o problema, sendo eles  $Ca$ ,  $N_\eta$ , e o parâmetro reológico  $Pl$ .

## 2.2 Análise da Fração Mássica

Ao estudar o deslocamento de um líquido viscoso através da injeção de outro (imiscível com o anterior) em um tubo capilar tem-se, de forma geral, dois parâmetros de interesse. Um, a fração de massa perdida, é associado com a relação entre a velocidade de deslocamento,  $U_b$ , e a velocidade média do fluido deslocado,  $U_2$ , e diz respeito à fração mássica que não foi possível retirar do interior do tubo. O outro, fração geométrica de massa depositada, diz respeito à espessura da camada do fluido deslocado que permanece aderida à parede do tubo.

Voltando à Figura 2.1 podemos observar que inicialmente o fluido 2 preenche totalmente o tubo e o escoamento é completamente desenvolvido (Região I). Ao se aproximar da gota o perfil de velocidades se altera (Regiões II e III) e em seguida tem-se novamente o escoamento desenvolvido no espaço anular entre a gota e o tubo (Região IV), uma vez que o raio da gota,  $R_b$  é constante.

A fração geométrica de massa depositada,  $m_g$ , é definida como a fração de massa de fluido 2 que permanece aderida à parede do tubo após a passagem da gota. Com base em uma análise na Figura 2.1, podemos avaliar este parâmetro de uma maneira simples a partir da Região IV. Considerando um cilindro de comprimento  $\Delta x$  inicialmente preenchido com fluido 2, este contém uma massa total de  $\rho_2 \pi R_0^2 \Delta x$ . Após a passagem da gota, a massa de fluido 2 restante é  $\rho_2 \pi (R_0^2 - R_b^2) \Delta x$ . Desse modo,  $m_g$  pode ser definido pela Equação 2.11, tornando possível sua avaliação a partir da imagem do deslocamento.

$$m_g = \frac{\rho_2 \pi (R_0^2 - R_b^2) \Delta x}{\rho_2 \pi R_0^2 \Delta x} = 1 - \frac{R_b^2}{R_0^2} \quad (2.11)$$

Já a fração de massa perdida,  $m_e$ , é definida como o complemento da fração mássica do fluido deslocado que deixa o tubo enquanto o fluido deslocador é injetado. Fazendo uso de um balanço de massas partindo da definição, podemos caracterizar  $m_e$  conforme a Equação 2.12. Assim podemos avaliar experimentalmente este parâmetro simplesmente coletando a massa que é expulsa do tubo durante o deslocamento.



$$m_e = \frac{\text{massa perdida}}{\text{massa total}} = 1 - \frac{\text{massa recuperada}}{\text{massa total}} \quad (2.12)$$

Apesar de que as definições apresentadas podem ser tomadas por triviais à primeira vista, uma vez que a massa específica do fluido 2 é constante, não é incomum que esses dois parâmetros sejam considerados equivalentes. No entanto, tal consideração seria válida apenas para o caso do deslocamento de um líquido por um gás. Na situação líquido-líquido,  $m_e$  e  $m_g$  representam parâmetros distintos.

A fim de esclarecer esta questão, consideremos o volume de controle de uma seção no meio do tubo, completamente preenchido com o fluido que será deslocado, representada na Figura 2.2a. Após a injeção do fluido deslocador, a seção analisada se apresentará conforme ilustrado na Figura 2.2b.

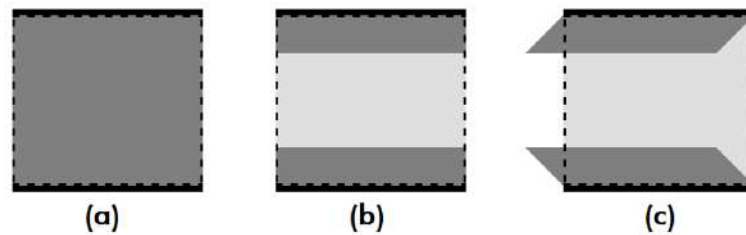


Figura 2.2: Representação esquemática do deslocamento líquido-líquido.

Agora, acompanhando exclusivamente o deslocamento da massa de fluido que se encontra inicialmente no volume de controle da Figura 2.2a, notamos que após a injeção do fluido deslocador, o elemento de massa em questão se apresentará conforme ilustrado na Figura 2.2c. Assim, é possível notar que a fração que deixa o volume de controle não é apenas equivalente ao volume que agora é ocupado pelo fluido deslocador, mas também deve-se levar em consideração a parte da camada que é arrastada para fora através do cisalhamento imposto pelas tensões na interface. Isso significa que a diferença entre a massa inicialmente no interior do tubo e a massa recuperada não é igual à massa restante no interior do tubo. Isso se deve ao fato de que parte da massa recuperada foi arrastada para fora (e não apenas empurrada) e parte da massa que resta no interior do tubo foi arrastada de fora para dentro do tubo, proveniente de uma fonte externa.

Analisando o problema de forma global, é evidente que a massa que deixa o volume de controle devido ao cisalhamento é substituída por uma quantidade de massa equivalente da região adjacente, deixando o tubo todo com o aspecto ilustrado pela Figura 2.2b. Ainda assim esta fração deve ser levada em consideração, pois a existência do cisalhamento faz com que  $m_e$  e  $m_g$  expressem frações de massa distintas. Na condição onde um líquido é deslocado por um gás, tal situação não ocorre uma vez que a viscosidade do gás e portanto o respectivo cisalhamento são desprezíveis, fazendo com que, nesse caso,  $m_e$  e  $m_g$  tornem-se iguais.

# CAPÍTULO 3

## METODOLOGIA

### 3.1 Seleção dos Fluidos

Este trabalho tem como objetivo estudar a influência do material viscoplástico como fluido deslocador na eficiência de recuperação e comparar com o caso newtoniano. Dessa forma, a necessidade de uma avaliação do caso newtoniano é intrínseca à este trabalho. Para tal, foi decidido que as razões de viscosidades estudadas deverão ser compatíveis às razões encontradas na literatura para que seja possível a comparação dos resultados. Diante do exposto, os valores 400, 4, 2, 1 e 0,5 representam valores adequados para as razões de viscosidades estudadas neste trabalho.

Dois líquidos imiscíveis que permitem produzir as razões desejadas são: uma solução de óleo de mamona e óleo de soja e uma solução de água, Polietileno Glicol (PEG) e álcool etílico. Ao utilizar uma solução no lugar de um único líquido temos a vantagem de poder ajustar as propriedades da mesma de acordo com a quantidade colocada de cada substância. Assim, é possível controlar não apenas a razão de viscosidades, mas também a razão de massa específicas, que deve ter o seu valor o mais próximo possível de 1. Para o caso viscoplástico, decidiu-se por usar uma solução de água com Gel para cabelo como fluido deslocador, devido à facilidade de obtenção e manipulação, mantendo o óleo de mamona como fluido deslocado.

## 3.2 Preparo e Caracterização dos Fluidos

Por apresentar maior viscosidade a solução de óleos foi designado para ser o fluido deslocado (fluido 2), dessa forma é preciso menor velocidade no escoamento para atingir maiores valores de número de capilaridade, além de manter reduzido o número de Reynolds. Previamente à avaliação das propriedades dos fluidos, foi determinada a temperatura ambiente do laboratório. Com o auxílio de um termômetro de mercúrio, diversas medições foram realizadas em horários diferentes e em dias diferentes e foi constatado que a temperatura ambiente média do laboratório era  $T_{amb} = 20,5^{\circ}\text{C}$ . É evidente que a temperatura estava sujeita a variações de acordo com o clima e com o número de pessoas no laboratório, no entanto essas variações eram facilmente corrigidas através de ajustes nas configurações de dois aparelhos de condicionamento de ar presentes no laboratório.

### 3.2.1 Soluções Newtonianas

O procedimento de preparo dos fluidos segue uma rotina de tentativas e erros, para determinar a quantidade certa de cada substância para que resultasse em uma combinação de soluções com as massas específicas de valores próximos e com viscosidades dinâmicas que satisfizessem as razões de viscosidades desejadas neste trabalho. Dessa forma, estima-se a quantidade de cada substância em cada solução que resultará em uma combinação de soluções com as propriedades desejadas e adiciona-se as mesmas em um béquer vedado. Em seguida a solução é misturada em um agitador eletromagnético *Nalgon HOTLAB II* até ficar homogênea. Então suas propriedades de viscosidade e massa específica são avaliadas e caso os valores obtidos não sejam satisfatórios, as concentrações da solução são alteradas e todo o processo de avaliação é repetido até atingir a combinação de soluções desejada.

A viscosidade das soluções é medida através de um viscosímetro do tipo Cannon-Fenske da marca *SCHOTT Instruments*, ilustrado na Figura 3.1. O procedimento de avaliação de viscosidade foi feito de acordo com o manual de instruções do equipamento. Inicialmente, o viscosímetro tem sua posição invertida verticalmente para que o tubo capilar (1) possa ser submerso no líquido a ser medido enquanto que

uma sucção é aplicada no tubo de ventilação (2) até que o nível de líquido atinja a marcação de tempo inferior (M2). Em seguida o viscosímetro é colocado em sua posição de medição padrão e imerso em um banho térmico. O equipamento utilizado para o banho é o *CT 52* da *SCHOTT Instruments*. Conhecendo-se a temperatura do laboratório durante a realização dos experimentos, as propriedades dos fluidos deverão ser avaliadas nas mesmas condições, isto é, à 20,5°C.

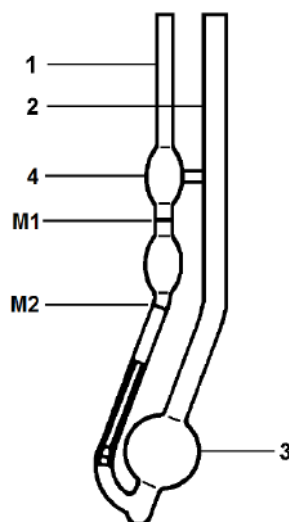


Figura 3.1: Representação esquemática de um viscosímetro do tipo Cannon-Fenske.

Após a imersão do viscosímetro no banho, aguarda-se 15 minutos para que ocorra a queda do fluido para o reservatório (3) e o equilíbrio térmico em todo o conjunto. Feito isto, uma sucção é aplicada no tubo capilar (1) até o nível de líquido atingir a esfera de pré-curso (4), passando da marcação de tempo inferior (M2) e superior (M1). Em seguida a sucção é retirada e o fluido escorre livremente pelo viscosímetro. Para determinar a sua viscosidade cinemática, basta medir o tempo que o nível de líquido leva para percorrer a distância entre a marca M1 e M2 (em segundos) e posteriormente multiplicar este valor pela constante do viscosímetro utilizado. O resultado encontrado é a viscosidade cinemática do líquido em cSt (centiStokes).

A viscosidade utilizada nos cálculos deste trabalho deve ser a viscosidade dinâmica e para obtê-la basta multiplicarmos a viscosidade cinemática pela massa específica do fluido. Para determinar a massa específica, foi utilizado um picnômetro calibrado de 10 ml. O picnômetro vazio e com tampa é posicionado em uma balança de precisão *Tecnal B-TEC 2200* que é tarada em seguida. Posteriormente a tampa é retirada e

o recipiente é preenchido até a borda com o fluido a ser avaliado. Prontamente, a tampa vazada é reposicionada e a quantidade excessiva de fluido transborda através do caminho da tampa. O picnômetro então é limpo e seco exteriormente e pesado em seguida. O valor indicado na balança representa a massa de 10 ml do fluido avaliado. De posse desses dados a massa específica pode ser facilmente determinada dividindo a massa pelo volume.

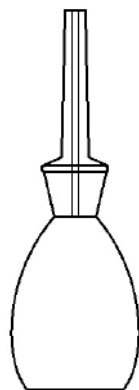


Figura 3.2: Representação esquemática de um picnômetro.

As propriedades das soluções elaboradas estão apresentadas nas Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1: Propriedades das soluções à base de água.

Solução	% Água	% Álcool	% PEG	$\rho[kg/m^3]$	$\mu[mPa.s]$
Solução A	41,7	16,6	41,7	1035,8	103,3
Solução B	69	31	0	971,5	2,4
Solução C	20,5	51,25	27,25	944,8	30

Tabela 3.2: Propriedades das soluções à base de óleo.

Solução	% Óleo de Mamona	% Óleo de Soja	$\rho[kg/m^3]$	$\mu[mPa.s]$
Óleo de Mamona	100	0	966,5	961,5
Óleo de Soja	0	100	924,3	61
Solução X	73,7	26,3	955,7	410,4
Solução Y	24	76	933,3	102,7
Solução Z	49,4	50,6	944,6	205,6

Uma vez de posse de uma combinação de soluções que reproduz a razão de viscosidades e razão de massas específicas desejadas, é preciso avaliar a tensão interfacial entre as duas. Para tal, primeiramente despeja-se o fluido de maior massa específica em um recipiente onde o teste será conduzido e em seguida, com o auxílio de um tensiômetro *Radian Series 300* da *Thermo Scientific*, um anel *Du Nouy* é lentamente inserido no fluido até ficar completamente submerso no mesmo. Posteriormente, despeja-se com delicadeza o outro líquido no mesmo recipiente. Finalmente, um comando é dado ao equipamento para que o anel comece a subir até romper a interface. Após o término do teste, a tensão interfacial é calculada a partir da força máxima obtida durante o rompimento da interface com base na Equação 3.1, onde  $C$  é a circunferência do anel. Essas etapas estão ilustradas na Figura 3.3.

$$\sigma = \frac{F_{max}}{2C} \quad (3.1)$$

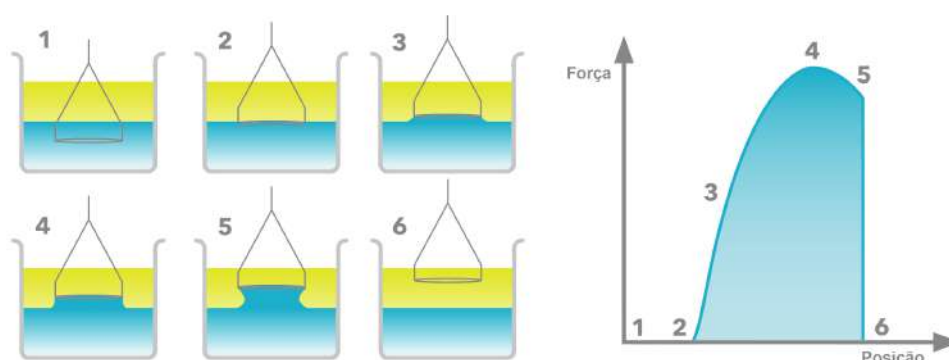


Figura 3.3: Representação esquemática do processo de medição da tensão interfacial.

As propriedades provenientes das interações entre as soluções à base de água e à base de óleo utilizadas neste trabalho estão apresentadas na Tabela 3.3.

### 3.2.2 Solução Viscoplástica

A solução viscoplástica foi elaborada com água e *Gel Fixador BOZZANO Sem Álcool*. Como não possuíamos base para a elaboração da solução, foi observado que uma concentração de Gel de 7,5% p/p apresentava boa consistência. A massa específica

Tabela 3.3: Propriedades provenientes das interações das soluções à base de água e de óleo.

Razão Desejada	Fluido Deslocador	Fluido Deslocado	$N_\rho$	$N_\mu$	Tensão Interfacial [mN/m]
400	Solução B	Óleo de Mamona	0,995	397	16,41
4	Solução A	Solução X	0,923	3,97	6,75
2	Solução C	Óleo de Soja	0,978	2,03	5,85
1	Solução A	Solução Y	0,901	0,99	6,94
0,5	Solução Z	Solução A	1,09	0,50	6,91

da solução foi determinada de forma análoga às soluções newtonianas, isto é, com um picnômetro.

Já a avaliação da tensão interfacial sofreu alterações. Como o material viscoplástico apresenta a tensão limite de escoamento, o mesmo apresenta uma resistência ao movimento do anel que não está relacionado com as forças interfaciais. Dessa maneira uma parcela da força registrada pelo equipamento não representa forças na interface e deve ser desprezada. Para tal, foi subtraído da força máxima encontrada o valor referente à força registrada pelo equipamento enquanto o anel se encontrava submerso no líquido viscoplástico (abaixo do óleo) e movimentando-se à velocidade constante distante da interface (força de arrasto). O valor resultante foi utilizado para o cálculo conforme a Equação 3.1. No caso newtoniano como o anel se desloca muito lentamente a força de arrasto era desprezível, como pode ser visto na Figura 3.4

Da mesma forma, o processo para determinação da viscosidade foi diferente do caso newtoniano, uma vez que o viscosímetro de Cannon-Fenske serve apenas para líquidos newtonianos. Com isso, o reômetro *Haake Mars III* da *Thermo Scientific* foi utilizado para avaliar suas propriedades, fazendo uso da configuração de placas paralelas (conforme ilustrado na Figura 3.6) com uma geometria de placa ranhurada *P35 TiL* com folga de 0,5 mm. Um volume de 0,5 ml de solução foi adicionado ao equipamento e imposto a taxa de  $10^{-4}$  à  $10^3$  durante 30 minutos. A *flow curve* obtida é apresentada na Figura 3.5.



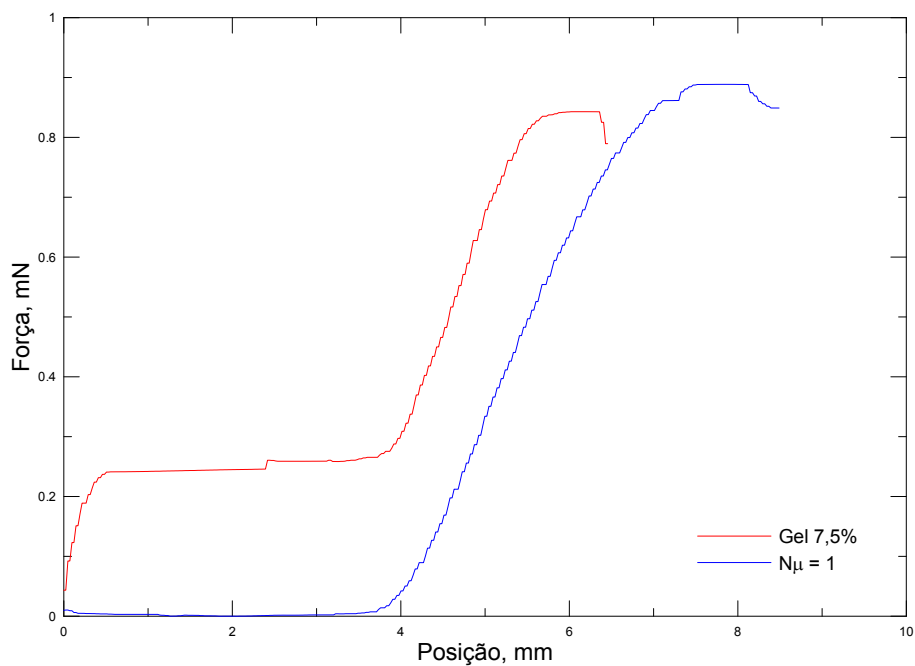


Figura 3.4: Acompanhamento da subida do anel durante a medição de tensão interfacial. Comparação dos casos newtoniano e viscoplástico.

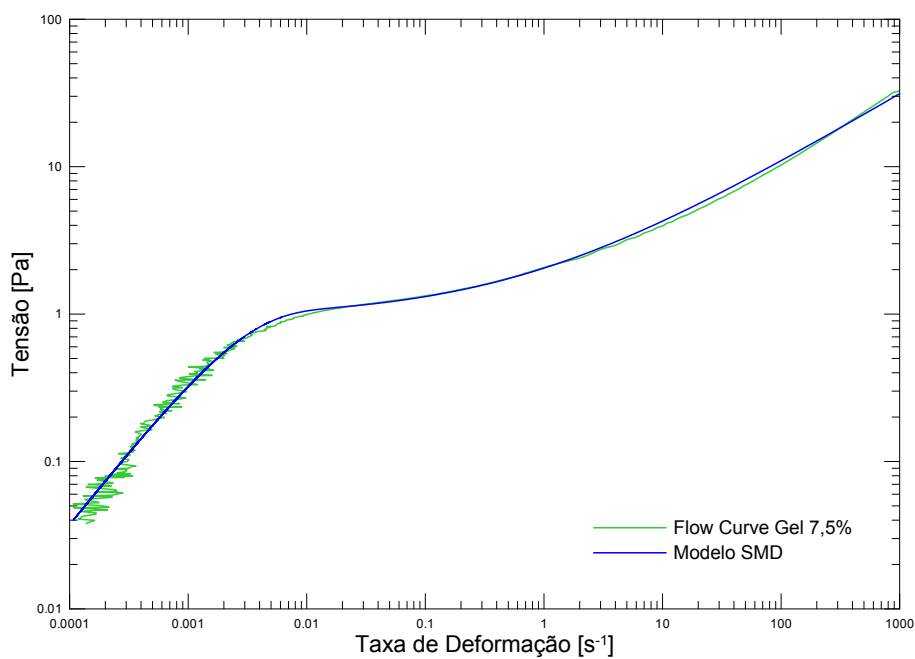


Figura 3.5: *Flow curve* da solução viscolástica e a curva do modelo SMD utilizado para caracterizá-la.

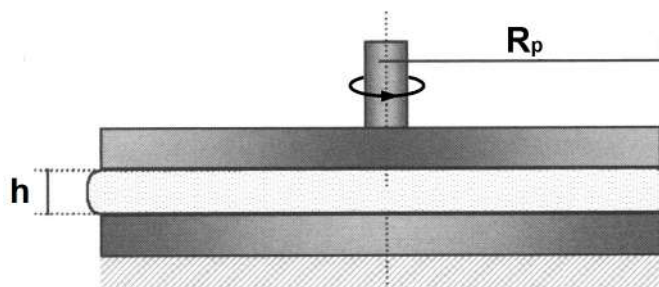


Figura 3.6: Representação esquemática da configuração de placas paralelas em um reômetro.

No intuito de caracterizar a solução à partir da sua *flow curve*, foi aplicado à curva o modelo SMD proposto por Souza Mendes e Dutra [8] e apresentado na Seção 1.2. A curva do modelo está sobreposta à curva obtida no reômetro (apresentada na Figura 3.5). Dessa forma é possível avaliar os parâmetros necessários para determinar a tensão limite de escoamento,  $\tau_0$ , e o número de plasticidade,  $Pl$ . Assim, as propriedades da solução são apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Caracterização da solução viscopástica

Propriedade	Valor
% Gel	7,5
$\rho [kg/m^3]$	1008,9
$\tau_0$	0,95
n	0,48
K	1,1
$\eta_0$	375

As propriedades provenientes da interação entre a solução viscoplástica (fluido deslocador) e o óleo de mamoma (fluido deslocado), são apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Propriedades provenientes da interação entre a solução viscoplástica e o óleo de mamona.

Fluido Deslocador	Fluido Deslocado	$N_\rho$	Tensão Interfacial [mN/m]
Gel 7,5%	Óleo de Mamona	0,958	5,07

### 3.3 Abordagem Experimental

Os testes foram realizados em uma bancada experimental a qual tem sua representação esquemática ilustrada na Figura 3.7.

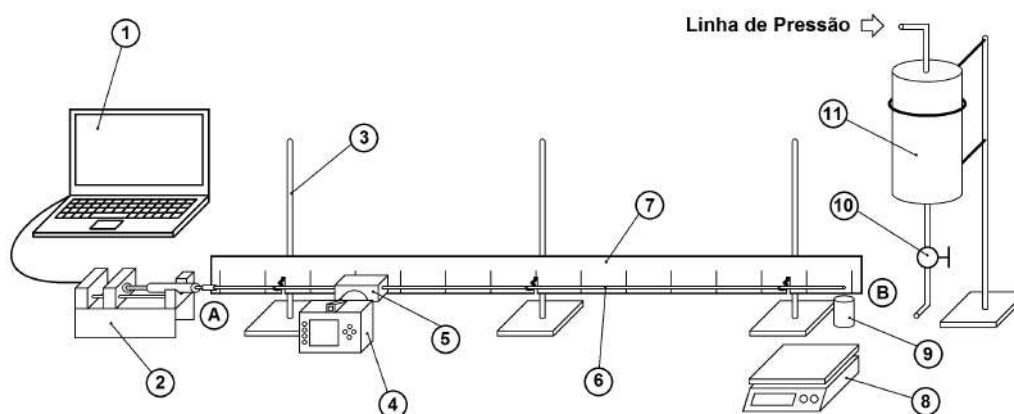


Figura 3.7: Representação esquemática da bancada experimental utilizada.

A bancada é composta por: uma bomba-seringa (2) da marca *Cole-Parmer* modelo *Syringe PMP CMPCT 115V*, contendo uma seringa preenchida com o fluido deslocador, controlada por um computador (1); um tubo capilar de vidro (6) com 150 cm de comprimento, 6 mm de diâmetro externo e 2 mm de diâmetro interno, que é apoiado por três hastes metálicas com ganchos (3); uma caixa de acrílico (5) de 4x4x10 cm; uma câmera fotográfica (4) da marca *Nikon*; uma régua (7) de 150 cm; uma balança (8) da marca *Tecnal*, modelo *B-TEC 2200*; um bquer (9) de vidro de 80 ml; um reservatório cilíndrico de acrílico (11) contendo o fluido deslocado e conectado à uma linha de pressão e controlado por uma válvula na saída (10).

Para a preparação do experimento, um tubo capilar de vidro (6) limpo e seco é posicionado nos ganchos das hastes metálicas (3) e é nivelado horizontalmente com o auxílio de um nivelador. A caixa de acrílico vazia (5) é então inserida no tubo e posicionada à

35 cm da extremidade A. Em seguida, a mangueira do reservatório (11) é conectada à extremidade B e a válvula é aberta, permitindo a entrada do fluido deslocado no interior do tubo, preenchendo-o por inteiro até transbordar na extremidade A, momento em que a válvula (10) é fechada.

Posteriormente, a seringa da bomba (6) é conectada à extremidade A do tubo e mangueira da extremidade B é removida. Seguidamente, a caixa de acrílico (5) é preenchida com glicerina, que possui índice de refração similar ao do vidro, reduzindo assim os efeitos de refração no momento da captura de imagens. A câmera então é posicionada e seu foco ajustado. Por fim, a balança (8) é tarada com a massa do béquer (9).

Após configurar a vazão da bomba (2) no computador (1), é dado o comando para que o deslocamento se inicie. No sentido de eliminar os efeitos de borda nos resultados obtidos, os 25 cm iniciais e finais foram desconsiderados. Para isso, a posição da frente de fluido deslocador é acompanhada com o auxílio da régua (7) à medida que escoar pelo interior do tubo e apenas no momento em que a frente atinge a posição de 25 cm, o béquer (9) é posicionado na saída do tubo (extremidade B) e inicia-se a recuperação de massa. Desse modo a massa deslocada durante os primeiros 25 cm é desprezada. Seguidamente, o béquer é removido quando a frente do fluido deslocador atinge a marcação de 125 cm na régua, também desconsiderando os 25 cm finais, eliminando assim os efeitos de borda. Ainda, durante todo o teste, a câmera registra o deslocamento através da captura contínua de imagens em intervalos de tempo iguais.

Após a retirada do béquer, é dado um comando ao computador e a bomba é desligada. A conexão entre a seringa e o tubo é removida e a caixa de acrílico esvaziada e desacoplada do tubo e ambos seguem para o procedimento de limpeza. O béquer então é pesado e a massa recuperada é registrada. As imagens obtidas são extraídas da câmera, armazenadas e catalogadas no computador para futura análise.

O procedimento de limpeza da caixa consiste em uma lavagem simples com deter-

gente neutro seguida de enxágue. Já os tubos capilares são limpos em um sistema apresentado esquematicamente na Figura 3.8. Dois tubos (1) são conectados simultaneamente a um reservatório de água (2) através de mangueiras e conexões metálicas. Uma válvula (3) regula a saída de água do reservatório e um balde (4) coleta a água na saída dos tubos. Após a válvula reguladora (3), um funil (5) aberto para a atmosfera e elevado por uma haste metálica também é conectado à linha de passagem de água.

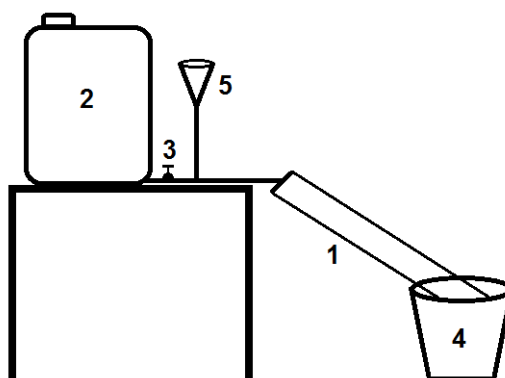


Figura 3.8: Representação esquemática do sistema de lavagem dos tubos capilares.

Para a limpeza, dois tubos são conectados ao reservatório simultaneamente com as extremidades livres posicionadas acima do balde, e em seguida a válvula é aberta liberando a passagem de água. Após dez minutos de água corrente a válvula é fechada e detergente neutro é introduzido no sistema através do funil. Uma vez que os tubos estão preenchidos com detergente, a válvula é aberta novamente para promover o enxágue e só é fechada após vinte minutos. Se necessário, mais detergente pode ser adicionado ao sistema e o processo se repete, até que a água na saída esteja completamente transparente e livre de resíduos. Finalmente, os tubos são colocados em uma posição vertical e preenchidos com álcool isopropílico para auxiliar na secagem. Para garantir que os tubos utilizados nos testes estejam completamente secos, os tubos só são reutilizados 24 horas após o término do processo de limpeza.

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aqui obtidos são subdivididos em cinco partes. Na seção 4.1 são apresentados os resultados preliminares onde a bancada experimental é validada e os resultados aqui obtidos são comparados os resultados disponíveis na literatura. Em seguida, a seção 4.2 apresenta os resultados obtidos dos experimentos exclusivamente newtonianos. Os resultados e discussões a respeito do caso viscoplástico são abordados na sequência, na seção 4.3. Finalmente, na seção 4.4 é feita uma análise detalhada das imagens capturadas nos testes, expondo as peculiaridades encontradas nos escoamentos.

### 4.1 Resultados Preliminares

Para que os experimentos possam ter relevância científica é preciso garantir que a bancada experimental montada apresente resultados válidos e confiáveis. A maneira utilizada para avaliar as incertezas experimentais consiste em comparar os resultados aqui obtidos com resultados de trabalhos consagrados existentes na literatura. Dessa forma, buscou-se reproduzir o caso estudado por [28] (gás deslocando um líquido), onde a razão de viscosidades entre o fluido deslocado e o fluido deslocador,  $N_{\mu}$ , tende ao infinito uma vez que a viscosidade do gás é significativamente baixa. Sabe-se que é impossível obter tal razão utilizando dois líquidos, no entanto, estudos anteriores [24] mostram que experimentos com  $N_{\mu} = 18,2$  tem comportamento equivalente à  $N_{\mu}$  infinito. Com o intuito de reproduzir a razão infinita, no presente trabalho foi usada a configuração de líquidos descritos na Seção 3.2, obtendo  $N_{\mu} = 400$ , onde a solução de

água e etanol desloca o óleo de mamona. Os resultados obtidos são representados na forma  $m \times Ca$  e comparados com os de [28] na Figura 4.1. Nota-se que as duas curvas apresentam o mesmo comportamento, o que valida a bancada experimental.

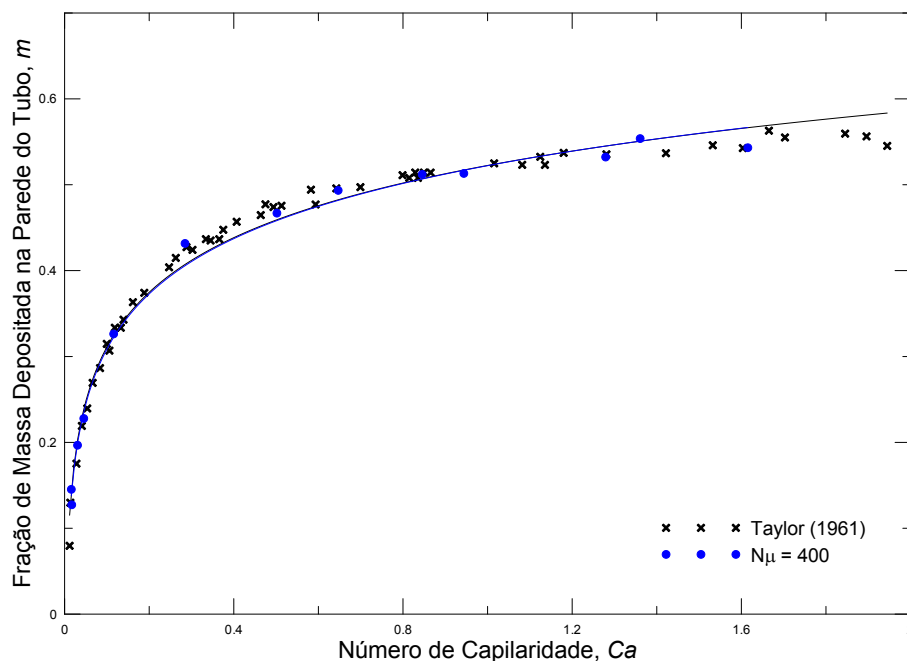


Figura 4.1: Comparação dos resultados obtidos por Taylor e os resultados obtidos neste trabalho para  $N_\mu = 400$ .

Ainda no sentido de qualificar a bancada experimental, é sabido que existe uma grande quantidade de informação à respeito do problema estudado neste trabalho, dessa forma é natural que os resultados aqui obtidos sejam comparados com outros na literatura. Nas Figuras 4.2 e 4.3 os resultados são comparados com os de [23], que conduziu estudos para determinar  $m_e$  e  $m_g$  em função de  $N_\mu$  e  $Ca$ , e também com os de [24], que fez uma avaliação experimental controlando a pressão no deslocamento.

Nota-se que os resultados aqui obtidos têm o mesmo padrão de comportamento que os resultados numéricos de [23], apesar de não serem perfeitamente iguais. As diferenças encontradas nos resultados existem devido ao fato de que algumas hipóteses simplificadoras não ocorrem na prática, como:  $Re = 0$  (os valores máximos de  $Re$  avaliados durante os experimentos são próximos a 1) e  $N_p = 0$ . Ainda, em alguns casos é possível observar instabilidades nas gotas, fazendo com que não fiquem

perfeitamente simétricas. Estas instabilidades e outros detalhes que merecem destaques são discutidos na seção a seguir. No entanto é possível concluir que a bancada experimental aqui utilizada (com controle de vazão) é mais precisa do que a utilizada por [24] (com controle de pressão) uma vez que os resultados deste trabalho mostram maior concordância com os resultados numéricos, proporcionando maior confiança nos resultados envolvendo outras razões de viscosidades.

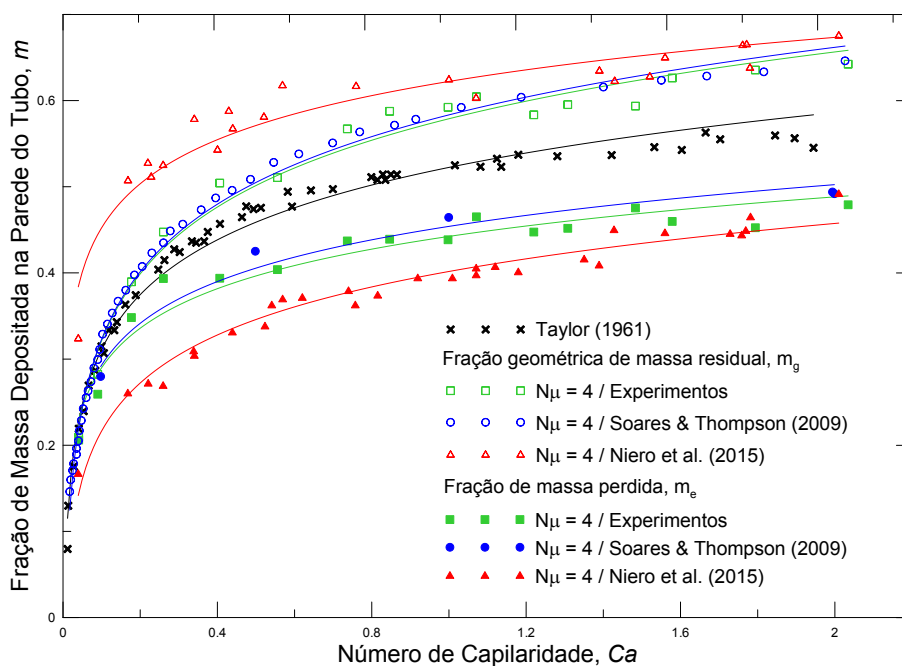


Figura 4.2: Comparação entre resultados numéricos e experimentais para  $N_\mu = 4$ .



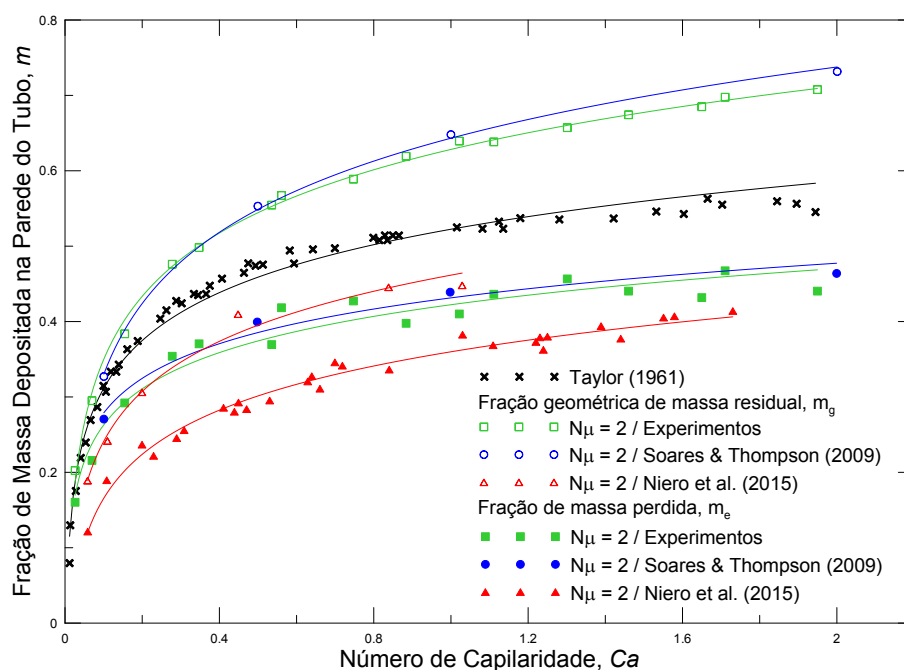


Figura 4.3: Comparação entre resultados numéricos e experimentais para  $N_{\mu} = 2$ .

## 4.2 Análise Newtoniana

Com o objetivo de compreender a influência do número de capilaridade e da razão de viscosidades na fração de massa perdida,  $m_e$ , e na fração geométrica de massa residual,  $m_g$ , foram realizados experimentos em uma ampla faixa de  $Ca$ , e valores fixos de  $N_{\mu} = 4; 2; 1; 0,5$ . Os resultados obtidos nos experimentos são apresentados na Figura 4.4, juntamente com os dados obtidos por [28].

Com base nos gráficos, nota-se que a eficiência de recuperação aumenta com a diminuição da razão de viscosidades, enquanto que a camada de fluido que fica aderida à parede do tubo fica mais espessa. Isso significa que ao injetar um líquido mais viscoso, a gota fica mais fina, mas ainda assim a recuperação de massa é maior devido ao cisalhamento do fluido inicialmente no interior do tubo imposto pelos efeitos viscosos. No entanto, os resultados obtidos sugerem que a eficiência aumenta até certo limite, onde  $N_{\mu} = 1$ , uma vez que a curva para  $N_{\mu} = 0,5$  apresenta o mesmo comportamento. Ou seja, para razões de viscosidades menores ou iguais a 1, a eficiência de recuperação não sofre alteração. Ainda, nota-se um comportamento assintótico das curvas para  $Ca$  maior que 1, onde os efeitos das tensões interfaciais ficam menos significativas.

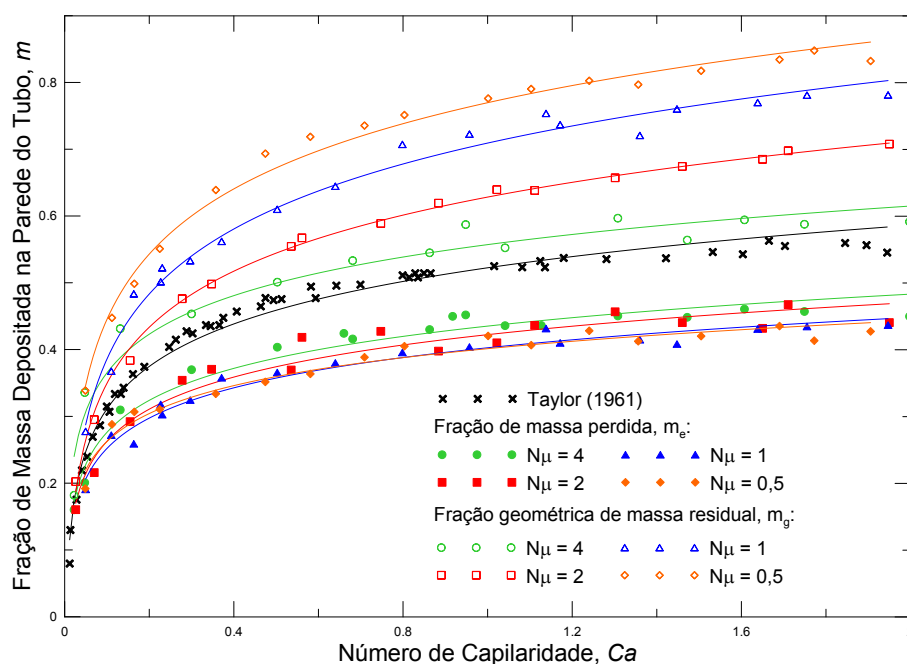


Figura 4.4: Fração de massa depositada na parede do tubo em função do número de capilaridade e razão de viscosidades.

### 4.3 O Caso Viscoplástico

Neste trabalho também foi estudado o caso onde o líquido deslocador é um fluido viscoplástico. Este líquido foi obtido através da mistura de água e *Gel Fixador Bozzano sem Álcool*, com concentração de 7,5% em peso do último, conforme descrito na Seção 3.2. O objetivo principal desta análise é identificar a influência da natureza plástica do material na eficiência de recuperação e na fração geométrica de massa residual.

Para tal, uma simples apresentação dos resultados em um gráfico  $m \times Ca$  em conjunto com os resultados newtoniano se tornaria inconclusiva, uma vez que cada ponto do caso viscoplástico representaria uma razão de viscosidade diferente. Por outro lado, para apresentar gráficos com diversos números de plasticidade para um valor fixo de razão de viscosidades (como os apresentados por [14]), seria necessário diversas soluções viscoplásticas diferentes. Dessa forma, ao buscar uma solução mais simples e no intuito de proporcionar uma comparação de resultados justa e conclusiva, cada resultado viscoplástico foi comparado com um ponto newtoniano equiva-

lente com mesmo número de capilaridade e mesma razão de viscosidades.

Para isso foram criados modelos matemáticos que se adequassem às curvas de  $m_e$  e  $m_g$  para cada  $N_{\mu}$  newtoniana. Dessa forma, para um determinado valor de  $Ca$  é possível obter seu  $m$  correspondente em qualquer  $N_{\mu}$  estudada. Os modelos obedecem a Eq. 4.1 e os respectivos coeficientes para cada curva são apresentados na Tabela 4.1.

$$m = \frac{ab + c(Ca)^d}{b + (Ca)^d} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1: Coeficientes dos modelos matemáticos utilizados nas curvas  $m \times Ca$

Razão	Parâmetro	a	b	c	d
4	$m_g$	0,0009	0,2252	0,7180	0,7646
4	$m_e$	0,0002	0,1223	0,5017	0,7849
2	$m_g$	0,0004	0,5242	0,9626	0,5465
2	$m_e$	0,0014	0,1912	0,5067	0,6948
1	$m_g$	-0,0001	0,3442	0,9617	0,6570
1	$m_e$	0,0002	0,2610	0,5116	0,6180
0,5	$m_g$	0,0013	0,3109	1,0172	0,6376
0,5	$m_e$	-0,0005	0,2312	0,4978	0,6035

Assim, um ponto viscoplástico é tomado como base, e a partir de seu  $Ca$  determinamos o valor de  $m$  correspondente em cada  $N_{\mu}$  newtoniana. Finalmente, o valor de  $m$  newtoniano correspondente à  $N_{\eta}$  do ponto viscolpástico tomado como base é determinado através de interpolação. Os resultados obtidos através dos modelos matemáticos e de interpolações são apresentados na Tabela 4.2. Os pontos viscoplásticos 1 e 2 da Tabela 4.2 foram comparados com os resultados do caso newtoniano para  $N_{\mu} = 0,5$ , uma vez que não foram produzidos curvas com  $N_{\eta}$  menor que este valor.

Dessa forma, a análise é feita com base na razão entre a fração de massa perdida (ou fração geométrica de massa residual) obtida no caso plástico e a obtida no caso

newtoniano, em função do número de plasticidade,  $Pl$ , introduzido na Seção 2.1. Os resultados são apresentados na Figura 4.5.

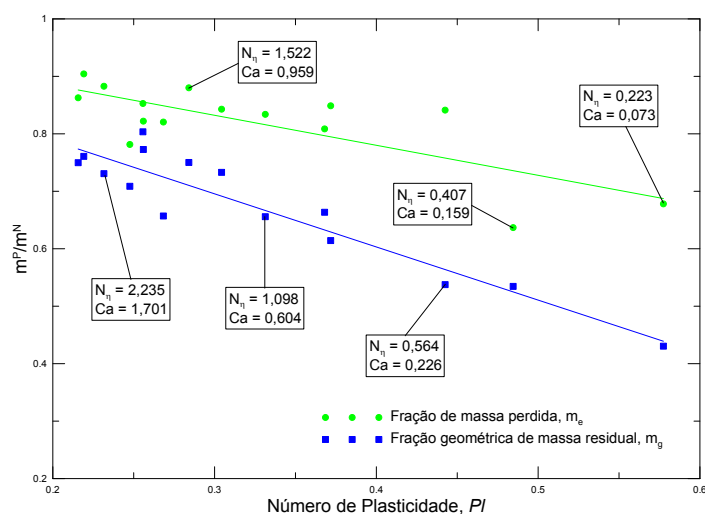


Figura 4.5: Razão entre os resultados viscoplásticos e newtoniano em função do número de plasticidade.

Tabela 4.2: Resultados Viscoplásticos em Comparação com Newtonianos

Ponto	$Pl$	$N_\eta$	$Ca$	$m_e^P$	$m_e^N$	$m_g^P$	$m_g^N$	$m_e^P/m_e^N$	$m_g^P/m_g^N$
1	0,577	0,223	0,073	0,159	0,234	0,166	0,385	0,678	0,430
2	0,485	0,407	0,159	0,186	0,292	0,272	0,508	0,637	0,535
3	0,443	0,564	0,226	0,266	0,316	0,299	0,557	0,841	0,538
4	0,372	0,858	0,417	0,301	0,354	0,378	0,615	0,849	0,614
5	0,368	0,879	0,431	0,288	0,357	0,409	0,617	0,809	0,664
6	0,331	1,098	0,604	0,316	0,379	0,421	0,642	0,834	0,656
7	0,304	1,344	0,783	0,337	0,400	0,481	0,656	0,843	0,733
8	0,284	1,522	0,959	0,364	0,414	0,500	0,667	0,880	0,750
9	0,268	1,730	1,130	0,350	0,426	0,439	0,669	0,821	0,657
10	0,256	1,862	1,291	0,357	0,434	0,520	0,673	0,822	0,773
11	0,256	1,865	1,295	0,371	0,435	0,541	0,673	0,853	0,804
12	0,248	1,988	1,416	0,344	0,441	0,477	0,673	0,781	0,709
13	0,232	2,235	1,701	0,397	0,450	0,500	0,684	0,883	0,731
14	0,219	2,475	1,973	0,423	0,468	0,525	0,690	0,904	0,761
15	0,216	2,528	2,059	0,395	0,458	0,518	0,691	0,863	0,750

Ao observar o gráfico fica claro que em todos os casos, a fração de massa perdida assim como a fração geométrica de massa residual são menores no caso viscoplástico. Isso significa que a eficiência do material viscoplástico é maior do que a do material newtoniano. Ainda nota-se que quanto maior o número de plasticidade, maior é a eficiência, e quanto menor, mais próximos os resultados ficam do caso newtoniano.

## 4.4 Análise de imagens

Durante a realização de todos os testes foram feitas capturas de imagens das gotas de deslocamento. Estas imagens foram trabalhadas e analisadas e são aqui apresentadas e discutidas. A princípio, a Figura 4.6 mostra uma comparação entre as frentes das gotas para valores de  $Ca$  e  $N_{\mu}$ , onde buscou-se montar linhas com o mesmo valor de  $N_{\mu}$  e colunas com valores próximos de  $Ca$ . É possível confirmar através destas imagens o comportamento observado na Figura 4.4, onde a gota tende a ficar mais fina à medida que  $Ca$  aumenta e  $N_{\mu}$  diminui.

Também foi feito um acompanhamento da configuração da gota ao longo do escoamento. Imagens foram capturadas durante todo o teste, sempre da mesma posição (à 40 cm da entrada do tubo), resultando em imagens da frente, meio e final da gota de acordo com o momento em que foram capturadas. As imagens referentes ao meio do deslocamento estão a uma distância da frente da gota de 425 raios do tubo, enquanto que as imagens do final estão a 850 raios do tubo de distância da frente da gota. As imagens obtidas são apresentadas nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, que mostram o comportamento das gotas ao longo do tubo em função de  $Ca$  para os valores de  $N_{\mu}$  estudados.

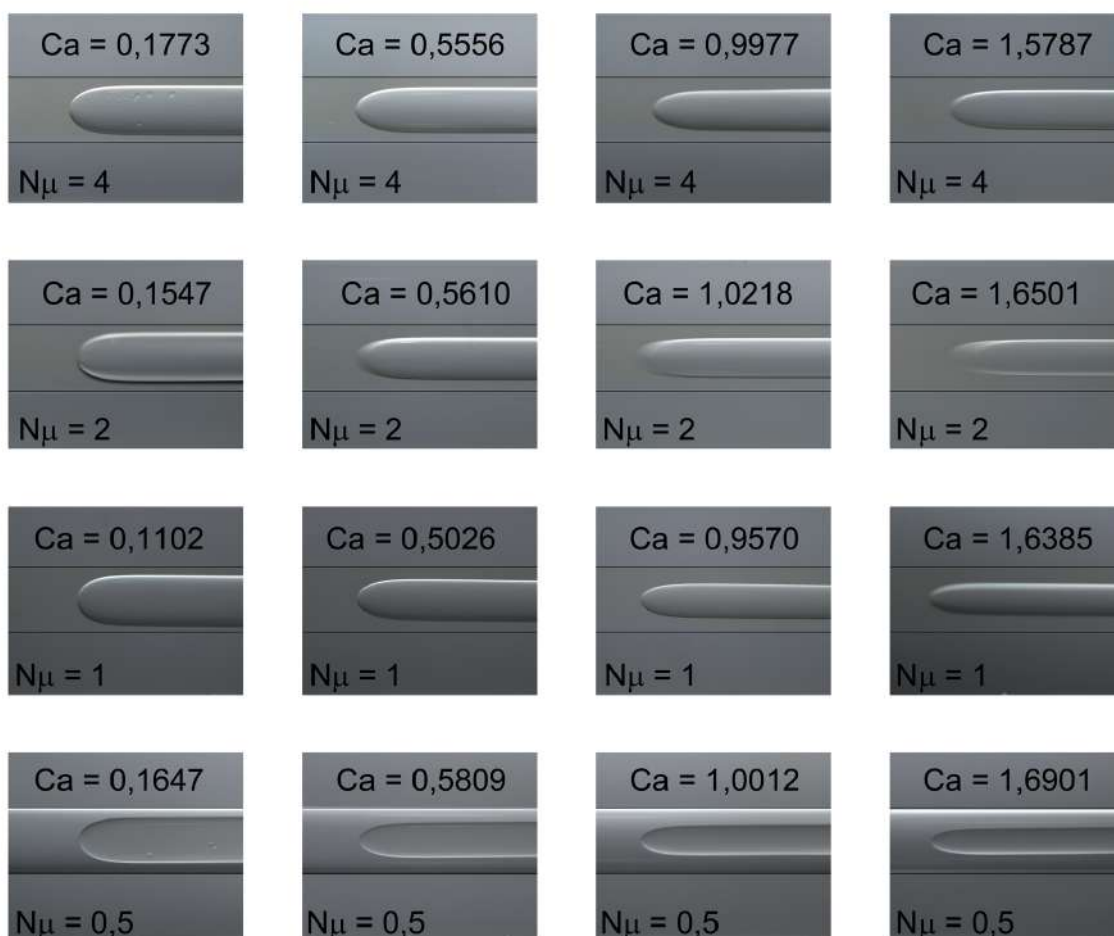


Figura 4.6: Comparação entre as frentes das gotas para valores de  $Ca$  e  $N_\mu$ .

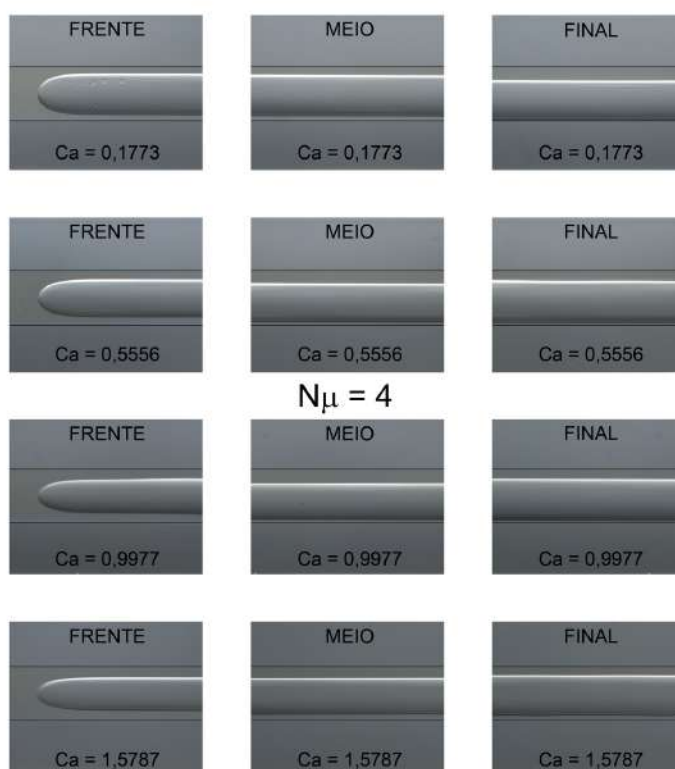


Figura 4.7: Estrutura da gota em diversos  $Ca$  para  $N_\mu = 4$ .

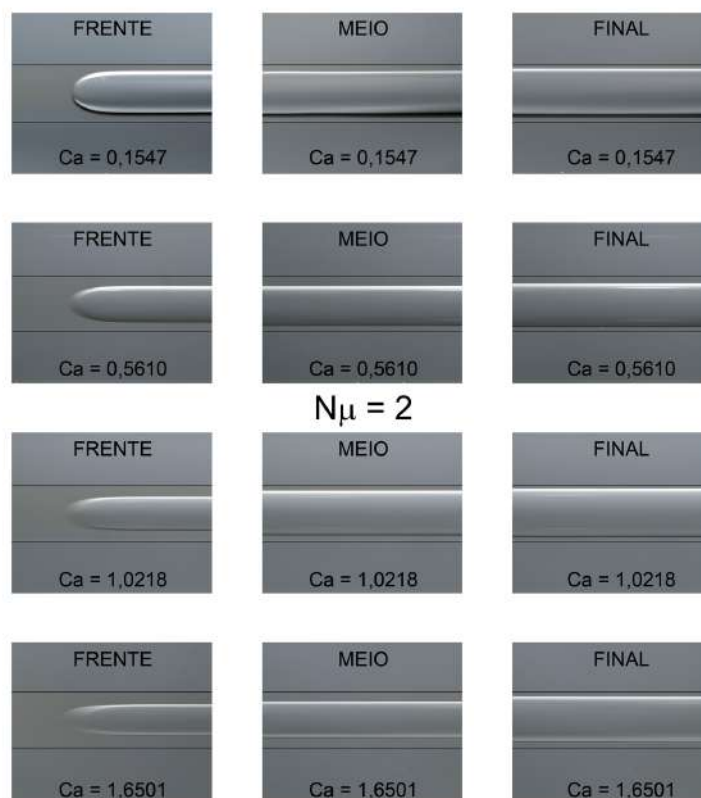


Figura 4.8: Estrutura da gota em diversos  $Ca$  para  $N_{\mu} = 2$ .

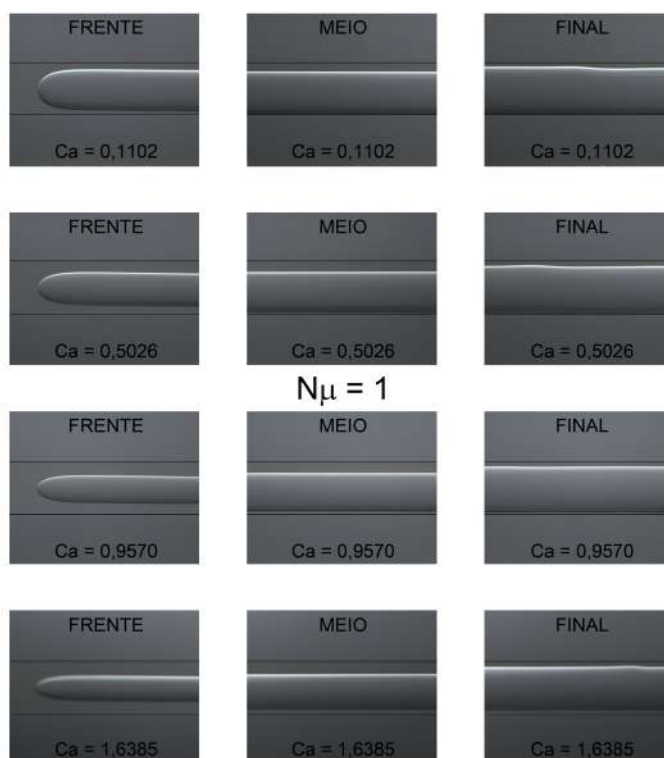


Figura 4.9: Estrutura da gota em diversos  $Ca$  para  $N_{\mu} = 1$ .

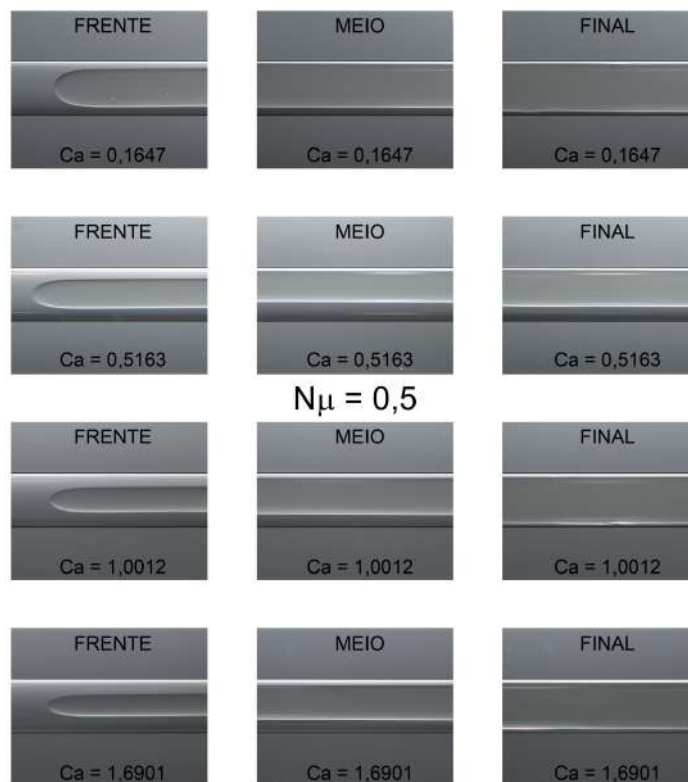


Figura 4.10: Estrutura da gota em diversos  $Ca$  para  $N_{\mu} = 0,5$ .



Figura 4.11: Estrutura da gota em diversos  $Ca$  e  $N_{\mu}$  no caso viscoplástico.



Nota-se através das imagens que no caso newtoniano, os escoamento com baixos valores de  $Ca$  as gotas apresentam uma estrutura mais estável do que para altos valores. Ainda podemos observar que as gotas tendem a aumentar o seu diâmetro ao longo do escoamento. Isso se deve ao fato de não haver uma fonte contínua do líquido deslocado na entrada do tubo, assim, a gota arrasta continuamente o fluido, afinando a película aderida à parede. Também é evidente nas imagens que a razão de massa específica, ainda que próxima de 1, afeta o escoamento, uma vez que a gota tende a se acomodar na parte inferior do tubo (e na parte superior no caso  $N_\mu = 0,5$ ) durante o escoamento.

No caso viscoplástico, é possível observar instabilidades significativas no escoamento quando comparados com o caso newtoniano equivalente, evidenciando o comportamento viscoplástico do material. Uma comparação entre o caso newtoniano e o caso plástico é apresentada nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14



Figura 4.12: Comparação entre a estrutura da gota no caso newtoniano e no caso viscoplástico para  $N_\mu = 2$ .



Figura 4.13: Comparação entre a estrutura da gota no caso newtoniano e no caso viscoplástico para  $N_{\mu} = 1$ .



Figura 4.14: Comparação entre a estrutura da gota no caso newtoniano e no caso viscoplástico para  $N_{\mu} = 0,5$ .

Após a análise das imagens, notou-se que o comportamento da gota nos casos  $N_{\mu} = 1$  e  $N_{\mu} = 0,5$  merece destaque. Foi observado que logo após a frente da gota, a mesma passa por uma contração abrupta onde seu diâmetro fica significativamente menor e em seguida aumenta gradativamente. Esse comportamento pode ser observado em uma ampla faixa de  $Ca$  e é apresentado na Figura 4.15.

Ao acompanhar o deslocamento da gota nesses casos, nota-se que a mesma apresenta diversas quebras sequenciais na posição onde o estrangulamento é formado. Essas quebras se propagam ao longo do corpo da gota à medida que o escoamento é desenvolvido. Esse comportamento é exposto na Figura 4.16. À exceção das outras imagens capturadas neste trabalho (capturadas à 40 cm da entrada do tubo), estas

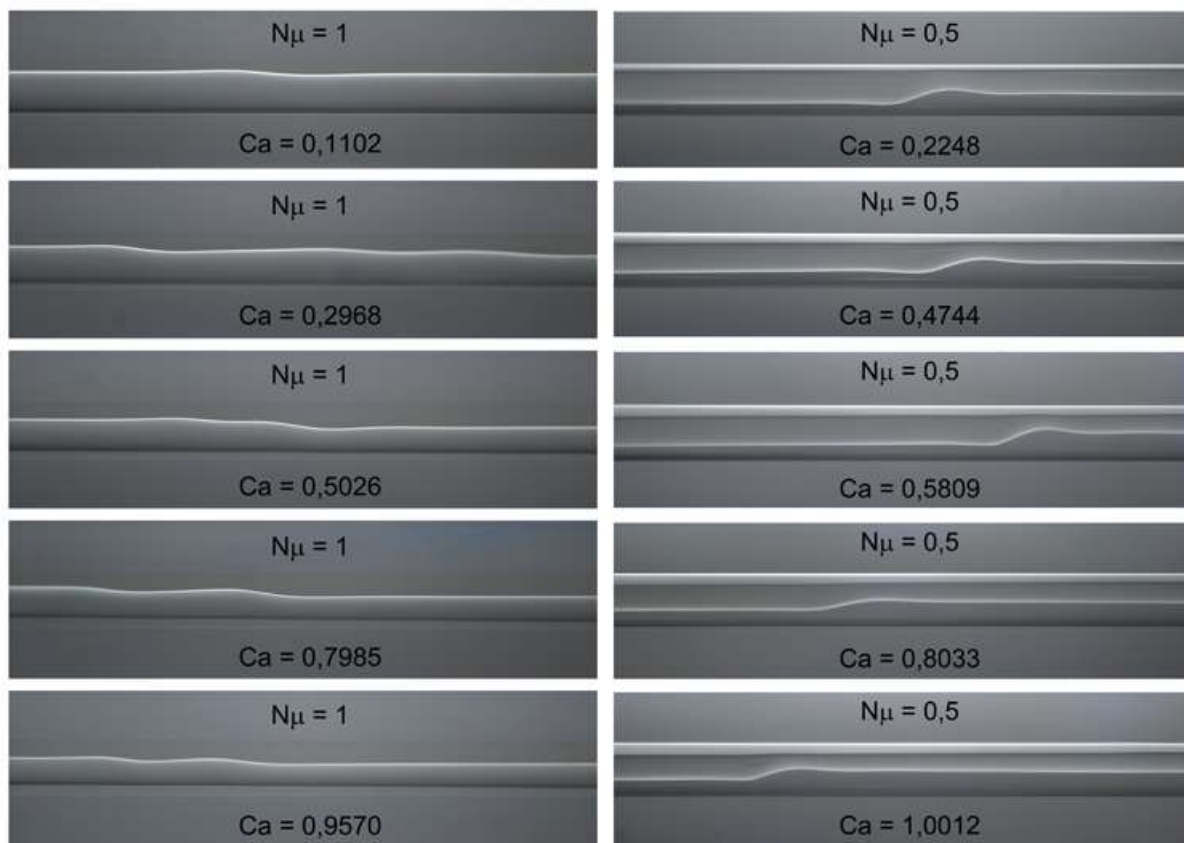


Figura 4.15: Contração abrupta das gotas para  $N_{\mu} = 1$  e  $N_{\mu} = 0,5$ .

da Figura 4.16 foram capturadas no meio do tubo, a fim de registrar o comportamento da gota em uma posição mais avançada no escoamento. As imagens representam a mesma posição em um mesmo teste em função do tempo, ou seja, é um acompanhamento do escoamento da gota. Nota-se que existe uma certa uniformidade nas quebras: as gotas formadas têm tamanho e formato semelhantes, ficam igualmente espaçadas e tendem a se acumular junto ao à parcela remanescente da primeira quebra (frente da gota).

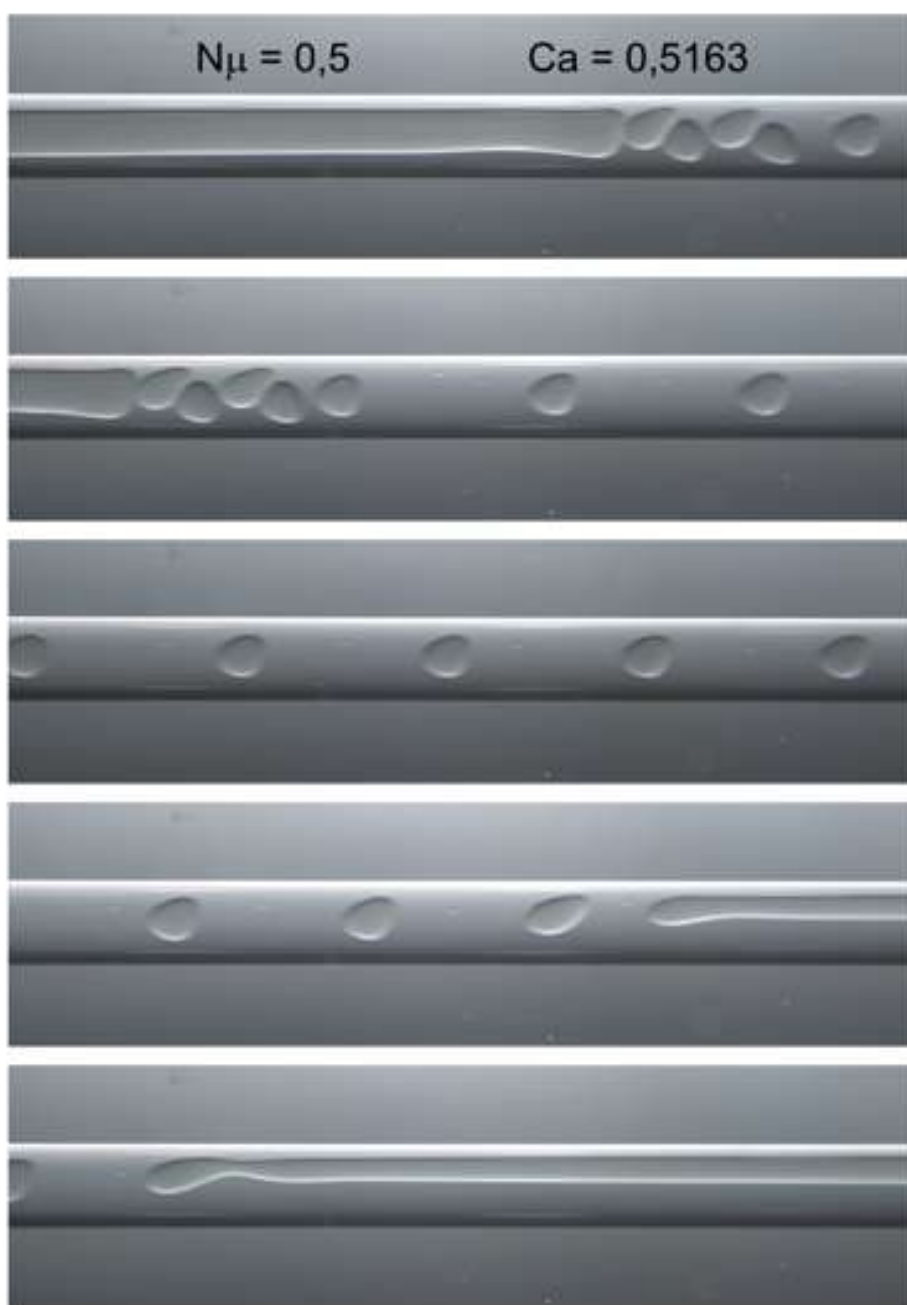


Figura 4.16: Acompanhamento do escoamento da gota no meio do tubo, evidenciando a propagação das quebras ao longo da gota para  $N_\mu = 0,5$ .

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSÕES

Este trabalho estudou o deslocamento de um líquido viscoso por outros líquidos viscosos (materiais newtonianos e viscoplásticos) imiscíveis ao anterior em um tubo capilar. A fração de massa perdida após o deslocamento,  $m_e$ , e a fração geométrica de massa restante na parede do tubo,  $m_g$ , foram avaliadas. Uma análise foi conduzida a respeito dos efeitos do número de capilaridade,  $Ca$ , e razão de viscosidades,  $N_\mu$ , sobre os parâmetros avaliados. O número de plasticidade,  $Pl$ , também foi analisado para o caso viscoplástico.

No que diz respeito à razão de viscosidades, foi observado que a diminuição da mesma acarreta um aumento na fração geométrica de massa depositada e uma diminuição da fração de massa perdida. Isso significa que quanto maior a viscosidade do líquido injetado, maior é a espessura da película que permanece aderida à parede e, ao mesmo tempo, maior é a eficiência de recuperação. Isso ocorre pois um líquido com viscosidade maior é capaz de recuperar mais massa através do arraste.

No entanto é importante destacar que, ao contrário da fração geométrica de massa depositada, a fração de massa perdida sofre influência da razão de viscosidades até um certo limite. Os resultados obtidos relativos à  $m_e$  para as razões 1 e 0,5 são semelhantes, indicando que a eficiência de recuperação deixa de receber influência da razão de viscosidades quando esta é inferior à 1. Já a fração geométrica de massa depositada aumenta indefinidamente (dentro dos limites avaliados neste estudo) com o aumento da razão de viscosidades.

O padrão de comportamento dos parâmetro estudados em função do número de capilaridade foi o mesmo. Em todos os casos as frações geométrica de massa depositada e a de massa perdida inicialmente aumentam significativamente com o aumento do número de capilaridade na faixa de  $0 < Ca < 0,4$ , e continuam aumentando após esta faixa, porém de forma mais atenuada. Finalmente, a partir de  $Ca = 1$ , os valores de  $m$  aumentam de uma maneira discreta.

Os resultados obtidos mostraram-se compatíveis com os resultados disponíveis na literatura. Como visto nas Figuras 4.2 e 4.3 os resultados obtidos no presente trabalho se aproximam de maneira satisfatória dos resultados numéricos obtidos por [23].

O caso viscoplástico apresentou maior eficiência de recuperação em todos os sentidos. Tanto a fração geométrica de massa depositada quanto a fração de massa perdida apresentaram valores menores quando comparadas com o caso newtoniano equivalente. Ademais, à medida que o número de plasticidade aumenta e os efeitos viscoplásticos ficam mais significativos, os parâmetros estudados apresentam valores ainda menores, indicando que a natureza viscoplástica do material aumenta a eficiência de recuperação.

No que diz respeito à análise das imagens capturadas, observou-se que no caso newtoniano ao acompanhar uma posição fixa do tubo ao longo do tempo, o diâmetro da gota aumentava. Ainda, nas razões de viscosidades 0,5 e 1 notou-se uma contração abrupta após a frente da gota propiciando uma sequência de rompimentos iguais. Em relação ao caso viscoplástico, tornou-se evidente através das imagens que a natureza não-newtoniana do material compromete a integridade e uniformidade da gota, provocando ondulações e instabilidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. ALLOUCHE, I. A. FRIGAARD, and G. SONA. Static wall layers in the displacement of two visco-plastic fluids in a plane channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 424:243–277, 12 2000.
- [2] E. C. Bingham. *Fluidity and Plasticity*. McGraw-Hill Book Company, New York, 1922.
- [3] F. P. Bretherton. The motion of long bubbles in tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, 10:166–188, 3 1961.
- [4] M. Cachile, R. Chertcoff, A. Calvo, M. Rosen, J. Hulin, and A. Cazabat. Residual film dynamics in glass capillaries. *Journal of Colloid and Interface Science*, 182(2):483 – 491, 1996.
- [5] B. G. Cox. On driving a viscous fluid out of a tube. *Journal of Fluid Mechanics*, 14:81–96, 9 1962.
- [6] D. A. de Sousa, E. J. Soares, R. S. de Queiroz, and R. L. Thompson. Numerical investigation on gas-displacement of a shear-thinning liquid and a visco-plastic material in capillary tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 144(2&3):149 – 159, 2007.
- [7] P. R. de Souza Mendes, E. S. Dutra, J. R. Siffert, and M. F. Naccache. Gas displacement of viscoplastic liquids in capillary tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 145(1):30 – 40, 2007.
- [8] P. R. de Souza Mendes and E. S. S. Dutra. A viscosity function for viscoplastic liquids. *Annual Transactions of the Nordic Rheology Society*, 12, 2004.

- [9] Y. Dimakopoulos and J. Tsamopoulos. Transient displacement of a newtonian fluid by air in straight or suddenly constricted tubes. *Physics of Fluids*, 15(7), 2003.
- [10] Y. Dimakopoulos and J. Tsamopoulos. Transient displacement of a viscoplastic material by air in straight and suddenly constricted tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 112(1):43 – 75, 2003.
- [11] Y. Dimakopoulos and J. Tsamopoulos. Transient displacement of newtonian and viscoplastic liquids by air in complex tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 142(1&3):162 – 182, 2007. Viscoplastic fluids: From theory to application.
- [12] F. Fairbrother and A. E. Stubbs. Studies in electro-endosmosis. part vi. the bubble-tube method of measurement. *J. Chem. Soc.*, pages 527–529, 1935.
- [13] J. Q. Feng. A long gas bubble moving in a tube with flowing liquid. *International Journal of Multiphase Flow*, 35(8):738 – 746, 2009.
- [14] J. F. Freitas, E. J. Soares, and R. L. Thompson. Immiscible newtonian displacement by a viscoplastic material in a capillary plane channel. *Rheologica Acta*, 50(4):403–422, 2011.
- [15] J. F. Freitas, E. J. Soares, and R. L. Thompson. Viscoplasticâviscoplastic displacement in a plane channel with interfacial tension effects. *Chemical Engineering Science*, 91:54 – 64, 2013.
- [16] H. L. Goldsmith and S. G. Mason. The flow of suspensions through tubes. ii. single large bubbles. *Journal of Colloid Science*, 18(3):237 – 261, 1963.
- [17] S. R. HODGES, O. E. JENSEN, and J. M. RALLISON. The motion of a viscous drop through a cylindrical tube. *Journal of Fluid Mechanics*, 501:279–301, 2 2004.
- [18] P. Huzyak and K. Koelling. The penetration of a long bubble through a viscoelastic fluid in a tube. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 71(1&2):73 – 88, 1997.
- [19] F. KamiÂli and M. E. Ryan. Perturbation method in gas-assisted power-law fluid displacement in a circular tube and a rectangular channel. *Chemical Engineering Journal*, 75(3):167 – 176, 1999.



- [20] E. LAC and J. D. SHERWOOD. Motion of a drop along the centreline of a capillary in a pressure-driven flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 640:27–54, 12 2009.
- [21] T. C. Papanastasiou. Flows of materials with yield. *Journal of Rheology*, 31(5), 1987.
- [22] E. Soares, M. Carvalho, and P. S. Mendes. Gas-displacement of non-newtonian liquids in capillary tubes. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 27(1):95 – 104, 2006.
- [23] E. J. Soares, M. S. Carvalho, and P. Mendes. Immiscible liquid-liquid displacement in capillary tubes. *Journal of Fluid Engineering*, 127(1):81–96, 9 2005.
- [24] E. J. Soares and R. L. Thompson. Flow regimes for the immiscible liquid-liquid displacement in capillary tubes with complete wetting of the displaced liquid. *Journal of Fluid Mechanics*, 641:63–84, 12 2009.
- [25] E. J. Soares, R. L. Thompson, and D. C. Niero. Immiscible liquid-liquid pressure-driven flow in capillary tubes: Experimental results and numerical comparison. *Physics of Fluids*, 27(8), 2015.
- [26] E. J. A. Soares, P. R. d. S. Mendes, and M. A. d. S. Carvalho. Immiscible liquid-liquid displacement in capillary tubes: viscoelastic effects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 30:160 – 165, 06 2008.
- [27] S. Taghavi, K. Alba, M. Moyers-Gonzalez, and I. Frigaard. 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, 2012.
- [28] G. I. Taylor. Deposition of a viscous fluid on the wall of a tube. *Journal of Fluid Mechanics*, 10:161–165, 1961.
- [29] R. L. Thompson and E. J. Soares. Viscoplastic dimensionless numbers. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, pages –, 2016.
- [30] S. Vanaparthi and E. Meiburg. Variable density and viscosity, miscible displacements in capillary tubes. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 27(3):268 – 289, 2008.