

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

DÉBORA CRISTINA NIERO

**EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE LÍQUIDOS EM TUBOS CAPILARES POR
INJEÇÃO DE FLUIDOS VISCOSOS**

VITÓRIA
2014

DÉBORA CRISTINA NIERO

**EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE LÍQUIDOS EM TUBOS CAPILARES POR
INJEÇÃO DE FLUIDOS VISCOSOS**

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

VITÓRIA
2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

Axx Niero, Débora Cristina, 1988-
Eficiência na recuperação de líquidos em tubos capilares por
injeção de fluidos viscosos / Débora Cristina Niero. – 2014.

Orientador: Edson José Soares.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) –
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Tubos capilares. 2. Recuperação de líquidos. 3. Razão de
Viscosidades. 4. Número de capilaridade. 5. Líquidos imiscíveis. I.
Soares, Edson José. II. Universidade Federal do Espírito Santo.
Centro Tecnológico. III. Título.

CDU:

DÉBORA CRISTINA NIERO

**EFICIÊNCIA DE RECUPERAÇÃO DE LÍQUIDOS EM TUBOS CAPILARES POR
INJEÇÃO DE FLUIDOS VISCOSOS**

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.

Aprovada em de maio de 2013.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edson José Soares - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Roney Leon Thompson
Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Renato do Nascimento Siqueira
Instituto Federal do Espírito Santo

“Algo só é impossível até que alguém duvide e acabe por provar o contrário.”

Albert Einstein

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem Ele não seria possível chegar até aqui.

Agradeço à minha família por torcer, apoiar e compreender todas as dificuldades no caminho pelo sucesso. A meu pai, Inacio Laudelino Niero (*in memoriam*) o maior incentivador para que fizesse um mestrado em engenharia, à minha mãe Jucemara Helena Niero, pelo apoio inesgotável durante essa jornada, a meu irmão Renan Willian Niero, por todo auxílio crucial em muitas etapas, e ao meu pequeno, Davi Niero Cardoso, que mesmo tão novo precisou entender a ausência da mãe e tinha um jeito todo especial de me alegrar nos momentos onde o desânimo e o cansaço fazia parte de mim.

Agradeço a meu companheiro, por toda paciência.

Agradeço ao meu professor e orientador, Edson José Soares, principalmente por toda compreensão, e por não ter desistido de mim. A trilha nesses últimos dois anos foi muito difícil, falecimento do meu pai, adaptação com criança, novo emprego. Sem dúvida ele foi fundamental no meu desenvolvimento acadêmico e no sucesso deste trabalho. Agradeço imensamente pelo apoio, cobranças, pelo compartilhamento de conhecimento e pela assistência prestada.

Agradeço aos professores que contribuíram com minha formação.

Agradeço a todos que torceram por essa vitória.

E por fim, agradeço à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e à Petrobras pelo financiamento dessa pesquisa.

RESUMO

Analisa-se experimentalmente o deslocamento de líquidos imiscíveis em tubos capilares. Uma aplicação importante é a recuperação de óleo em meios porosos, onde se faz uso da injeção de fluidos a fim de aumentar a pressão do reservatório e deslocar o óleo que não foi produzido com a pressão natural. A análise capilar é uma forma simplificada e comumente usada para abordar o problema. Tipicamente, devido às elevadas viscosidades dos fluidos envolvidos e às baixas velocidades de deslocamento, estes processos ocorrem com efeitos inerciais desprezíveis e, portanto, todos os testes são conduzidos para valores baixos de número de Reynolds. As escalas envolvidas no processo são muito pequenas o que tornam as forças capilares extremamente importantes. O número de capilaridade é explorado desde valores bem pequenos até seu limite assintótico. Um aspecto considerável do problema é o efeito da razão de viscosidade na fração de massa de óleo não recuperada durante o processo de injeção do líquido removedor. Apresentam-se também visualizações das interfaces das bolhas formadas entre o líquido removedor e o deslocado que indicam uma forte relação da instabilidade com a razão de viscosidade. Dado um mesmo número de capilaridade, a fração geométrica de massa residual m_g aumentou com a diminuição da razão de viscosidades, exceto para a menor razão de viscosidades testada. Já a fração de massa perdida m_e calculada conforme uma razão entre a massa recuperada e total ou entre as velocidades diminuiu com a diminuição da razão de viscosidades em um mesmo número de capilaridade. A existência de um filme residual não uniforme ao longo do escoamento da bolha pelo tubo capilar pode estar relacionado com a não concordância entre os resultados.

Palavras – chave: Líquidos imiscíveis, tubos capilares, razão de viscosidades.

ABSTRACT

We analyze experimentally the displacement of immiscible liquids in capillary tubes. An important application is the oil recovery in porous media, in which use is made of injection fluid to increase the pressure in the reservoir and displace the oil that has not been produced with natural pressure. A capillary analysis is a simplified form and commonly used to approach the problem. Typically, due to the high viscosities of the fluids involved and the low travel speeds, these processes occur with negligible inertial effects, and thus, all tests are conducted at low values of Reynolds number. Scales involved in the process are very small which make the capillary forces extremely important. The capillary number is explored from very small values to its asymptotic limit. A very significant aspect of the problem is the effect of viscosity ratio on the mass fraction of oil not recovered during the injection of the removing liquid. Views of the interfaces of the bubbles formed between the removing liquid and shifted liquid are presented too, indicating a strong relationship of the instability with viscosity ratio. Given the same number of capillarity, the geometric fraction of residual mass m_g increased with decreasing viscosity ratio, except for the lowest ratio of viscosities tested. Already the fraction of lost mass m_e calculated as the ratio between recovered and total mass or between the velocities decreased with decreasing viscosity ratio on the same capillary number. The existence of a non-uniform residual film over the bubble flow through the capillary tube can be associated with the non-concordance between the results.

Keywords: Immiscible liquids, capillary tubes, viscosity ratio.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– Lado esquerdo: representação esquemática do processo de recuperação de óleo por injeção de fluido em um meio poroso. Lado direito: modelo físico do escoamento em um tubo capilar.	18
Figura 1.2– Regimes de escoamento propostos por Taylor (Taylor, 1961) para um deslocamento gás-líquido. a) by-pass, b) regime de transição, c)recirculação completa.....	21
Figura 1.3 – Representação do problema.	28
Figura 3.1– Preparo da solução de PEG 70% peso / peso, início e final da homogeneização da mistura.	36
Figura 3.2 – Representação esquemática do viscosímetro utilizado.....	38
Figura 3.3 – Equipamento utilizado para medição das densidades dos fluidos.	40
Figura 3.4 – Tensiômetro de anel.....	41
Figura 3.5 – Representação esquemática da bancada experimental.....	42
Figura 3.6 – Representação esquemática do problema.....	51
Figura 4.1 – Representação esquemática da visão lateral e frontal da bolha dentro do tubo capilar.....	56
Figura 4.2 – Validação da bancada experimental.	57
Figura 4.3 – Número de capilaridade <i>versus</i> fração de massa perdida (m_e).....	58
Figura 4.4 – Número de capilaridade <i>versus</i> fração geométrica de massa residual (m_g).....	60

Figura 4.5 – Comparação entre os resultados experimentais com os obtidos por Soares et al. (2005). Análise pela imagem.....	61
Figura 4.6 – Fração de massa depositada no tubo em função do número de capilaridade e da razão de viscosidades.....	63
Figura 4.7 – Imagem da bolha. $N\mu=18,22$, $Ca=0,02$, $m_g =0,163$	65
Figura 4.8 – Imagem da bolha. $N\mu=18,22$, $Ca=0,16$, $m_g =0,354$	65
Figura 4.9 – Imagem da bolha. $N\mu=18,22$, $Ca=0,45$, $m_g =0,461$	66
Figura 4.10 – Imagem da bolha. $N\mu=18,22$, $Ca=0,55$, $m_g =0,49$	66
Figura 4.11 – Imagem da bolha. $N\mu=18,22$, $Ca=0,86$, $m_g =0,517$	66
Figura 4.12 – Imagem da bolha. $N\mu=4,02$, $Ca=0,40$, $m_g =0,543$	66
Figura 4.13 – Imagem da bolha. $N\mu=4,02$, $Ca=0,44$, $m_g =0,568$	66
Figura 4.14 – Imagem da bolha. $N\mu=1,82$, $Ca=0,06$, $m_g =0,189$	66
Figura 4.15 – Imagem da bolha. $N\mu=1,82$, $Ca=0,11$, $m_g =0,242$	66
Figura 4.16 – Imagem da bolha. $N\mu=1,82$, $Ca=0,20$, $m_g =0,306$	66
Figura 4.17 – Imagem da bolha. $N\mu=1,82$, $Ca=45$, $m_g =0,410$	67
Figura 4.18 – Imagem da bolha. $N\mu=1,82$, $Ca=0,84$, $m_g =0,446$	67
Figura 4.19 – Imagem da bolha. $N\mu=1,82$, $Ca=1,03$, $m_g =0,478$	67

LISTA DE SÍMBOLOS

U_b : velocidade da bolha (m/s)

ρ : massa específica (kg/m³)

m : fração de massa remanescente na parede do tubo

m_e : fração de massa perdida

m_g : fração geométrica de massa residual

μ_1 : viscosidade dinâmica do fluido 1 (Pa.s)

μ_2 : viscosidade dinâmica do fluido 2 (Pa.s)

N_μ : razão de viscosidades

Ca : número de capilaridade

m_c : massa crítica

σ : tensão interfacial (N/m)

D : diâmetro do tubo (m)

$\overline{U_2}$: velocidade média do fluido deslocado

R_o : raio do tubo (m)

R_b : raio da bolha (m)

Pe : número de Peclet

Re : número de Reynolds

N_p : razão de massas específicas

∇ : nabla

g: gravidade

S: tensor taxa de deformação (1/s)

P: pressão (Pa)

v: velocidade (m/s)

R_m : raio de curvatura médio (m)

z_1 : altura na direção da gravidade (m)

Δx : comprimento do cilindro (m)

V: volume (m³)

m_t : massa total (kg)

\dot{m}_2 : vazão mássica de fluido 2 (kg/s)

$\overline{U_2^d}$: velocidade média do fluido 2 arrastado (m/s)

D_b : diâmetro da bolha (m)

D_o : diâmetro interno do tubo capilar (m)

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XII
SUMÁRIO	XIV
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Motivação	Erro! Indicador não definido.
1.2 Objetivos	19
1.3 Estado da arte	19
1.4 Caracterização do problema	27
CAPÍTULO 2 FORMULAÇÃO FÍSICA	300
2.1 Análise dimensional	30
CAPÍTULO 3 ABORDAGEM EXPERIMENTAL	33
3.1 Seleção e preparo dos fluidos	33
3.2 Caracterização das amostras	37
3.2.1 Viscosímetro - teste de viscosidade	38
3.2.2 Medida da massa específica	39
3.2.3 Tensiômetro de anel - testes de tensão interfacial	40
3.3 Descrição dos experimentos realizados	42
3.3.1 Componentes da bancada experimental	42
3.3.2 Descrição dos procedimentos experimentais	45

3.3.3 Cálculos para obtenção dos resultados.....	51
CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	55
4.1 Validação da bancada experimental	55
4.2 Análise da fração geométrica de massa residual m_g e da fração de massa perdida m_e em função do número de capilaridade e da razão de viscosidades.....	58
CAPÍTULO 5 COMENTÁRIOS FINAIS.....	68
REFERÊNCIAS.....	700

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A recuperação de um líquido através da injeção de um fluido é alvo de importantes pesquisas no ramo da mecânica dos fluidos e que tem recebido atenção especial da comunidade científica em função do grande número de aplicações onde pode ser encontrada. Está presente nos processos de revestimento, de recuperação de óleo em meios porosos, da cimentação de poços, de fabricação de materiais plásticos ou até mesmo nas aplicações em estudos biológicos, como os que envolvem o movimento de hemácias por capilares sanguíneos.

Particularmente, muitos estudos envolvendo escoamentos multifásicos vêm sendo realizados para analisar e aprimorar processos desempenhados na indústria petrolífera e até mesmo para desenvolver novos procedimentos. Das atividades de destaque na indústria do petróleo, enfatizam-se aquelas que envolvem a recuperação de óleo em meios porosos e a cimentação de poços de petróleo.

O petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos que pode ser encontrado, mediante fatores adequados de formação e aprisionamento em rochas porosas com propriedades específicas chamadas de rochas reservatórios. É sabida a demanda crescente por essa fonte de energia não renovável de origem fóssil. Da quantidade de petróleo existente nos reservatórios, apenas uma pequena fração pode ser retirada na prática. O desenvolvimento de metodologias avançadas e estudos que tornem possível extrair mais o óleo residual ou caracterizar e definir o comportamento deste perante essas metodologias aplicadas permite aumentar a rentabilidade dos campos petrolíferos e estender sua vida útil. O entendimento a respeito do escoamento de fluidos em meios porosos contribui a fim de evitar uma previsão imprecisa, a qual pode causar danos à formação, alterar as características do óleo e inviabilizar a produção.

Para a investigação desse processo, uma forma simplificada de se compreender o processo de recuperação em um meio poroso é caracterizá-lo como sendo uma formação porosa contendo ligações de pequeno calibre entres os poros, ou seja, uma rede de capilares. O acúmulo e o deslocamento de óleo ocorrem no interior dessas vias. A análise do processo de recuperação de óleo em tubos capilares é a primeira aproximação para o problema complexo de recuperação de óleo em meios porosos.

A produção natural do petróleo depende da energia interna do reservatório e é devida à pressão dos fluidos confinados nos poros da rocha reservatório. Quando essa pressão não é suficiente para que o óleo seja produzido faz-se uso de um método de recuperação, o qual consiste na injeção de materiais para retirada do óleo residual. A eficiência dos métodos de recuperação depende das características do meio poroso, da natureza dos fluidos deslocador e deslocado e do arranjo dos poços de produção e injeção.

As baixas recuperações resultantes de um processo convencional de injeção de fluidos podem ser relacionadas a dois principais fatores: alta viscosidade do óleo do reservatório e elevadas tensões interfaciais entre o fluido injetado e o óleo. Quando a tensão interfacial entre os fluidos é muito alta, o fluido injetado não consegue penetrar nos poros, comprometendo a eficiência do deslocamento. Se a viscosidade do fluido de injeção for muito menor que a do óleo, o fluido injetado escoar mais facilmente pelo meio poroso, por caminhos preferenciais, direcionando-se rapidamente até o poço produtor, sem varrer o óleo das zonas de menor permeabilidade. A compreensão da relação dessas propriedades características dos fluidos é primordial para o estudo da eficácia da recuperação.

A Figura 1.1 é uma representação esquemática do processo de recuperação de petróleo quando a molhabilidade do óleo na rocha é maior que a molhabilidade do fluido injetado. O lado esquerdo representa a remoção do petróleo em meios porosos por injeção de fluido e do lado direito a aproximação do escoamento nos poros, como escoamento em um tubo capilar.

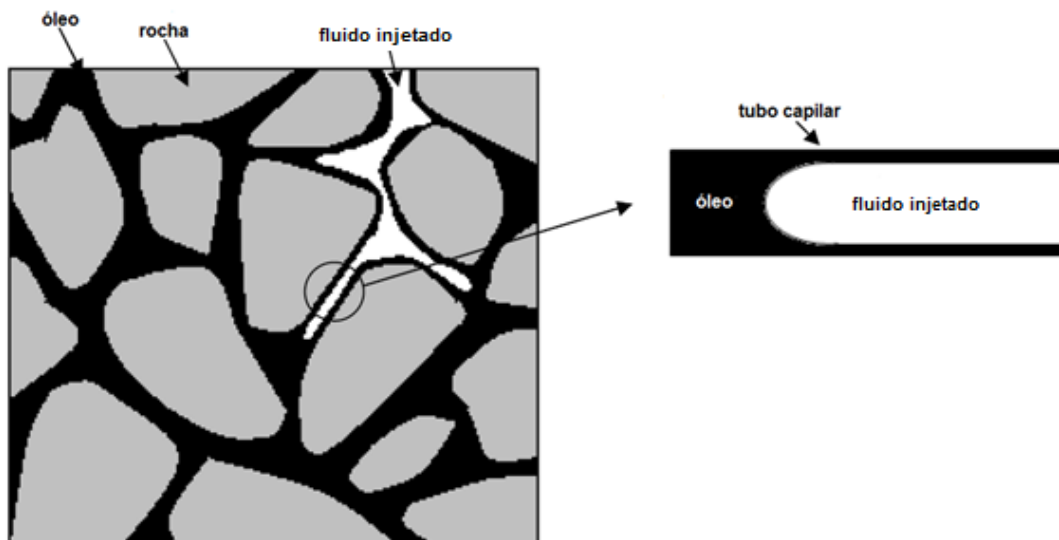


Figura 1.1 - Lado esquerdo: representação esquemática do processo de recuperação de óleo por injeção de fluido em um meio poroso. Lado direito: modelo físico do escoamento em um tubo capilar.

O fluido 2 representa o óleo que se deseja extrair do meio poroso e o fluido 1 representa o material injetado. A película do fluido 2 remanescente na parede da rocha contribui para parcela de óleo não recuperado pelo processo. A aproximação dos poros da rocha por um tubo capilar se revela extremamente útil no estudo da eficiência da recuperação do óleo. Analisa-se tal eficiência através do estudo da fração de massa que fica depositada na parede do tubo capilar após a injeção do fluido que atua como removedor.

O estudo do deslocamento de líquidos por injeção de fluidos viscosos é também importante para o aperfeiçoamento do processo de cimentação de poços de petróleo. Esta atividade é realizada após a descida da coluna de revestimento, que visa preencher com uma pasta de cimento o espaço anular entre a tubulação de revestimento e as paredes do poço, de forma a fixar a tubulação, e que, tem ainda como objetivo, promover o isolamento hidráulico das zonas permeáveis. Previamente ao bombeio da pasta de cimento é necessário que se faça a remoção do fluido de perfuração e de eventuais cascalhos que porventura tenham restado no espaço anular, evitando-se assim, problemas de ordem estrutural na cimentação do poço. Com esse objetivo é feita então a injeção do colchão de lavagem e/ou espaçador. Sauer (1987) e Carney (1974) salientam que esses fluidos devem ser eficientes na remoção, mas também fáceis de ser deslocados pela pasta de cimento,

quando a mesma for bombeada e ainda ser compatível tanto com o fluido de perfuração quanto com a pasta de cimento para que não haja formação de emulsão. Outra característica importante é que o fluido usado como espaçador não deve alterar bruscamente a viscosidade e o tempo de bombeamento da pasta de cimento.

Outros processos fora da indústria petrolífera também incentivam estudos a respeito do deslocamento de fluidos. Quando o objetivo é realizar o revestimento interno em dutos, o modelo de deslocamento de fluidos em tubos capilares é o que melhor representa o acabamento de superfície interna do tubo. Os processos de revestimento são largamente utilizados em alguma etapa da manufatura. Sinteticamente os procedimentos envolvidos incluem inicialmente, preencher o tubo com o líquido que se deseja depositar em sua superfície e, em seguida, injetar gás por uma das extremidades do tubo. Ao final do processo, uma película de líquido permanece depositada na parede interna, conferindo ao tubo um acabamento superficial. Este acabamento é tão mais preciso quanto maior for o controle sobre a espessura de filme depositado.

1.2 Objetivos

É realizado um estudo experimental da recuperação de óleo em tubos capilares através da injeção de materiais newtonianos.

O principal objetivo do presente trabalho é investigar o efeito da razão de viscosidades e do número de capilaridade sob a fração de massa de líquido depositada na parede de um tubo capilar quando é realizada a injeção de outro líquido newtoniano e estudar como esses parâmetros alteram a forma da interface entre os dois líquidos.

1.3 Estado da arte

Devido às inúmeras aplicações em importantes atividades de interesse, o escoamento de fluidos em tubos apresenta grande destaque na literatura no campo da Mecânica dos Fluidos. Nessa seção, são apresentados de forma concisa, alguns

trabalhos e suas respectivas conclusões, que estejam de alguma forma, relacionados ao escopo desse estudo.

As primeiras publicações a respeito da recuperação de fluidos remetem aos pioneiros Fairbrothers e Stubbs, que em 1935, publicaram um trabalho onde tratavam da remoção de fluidos newtonianos através da injeção de gás. Nessa publicação, foi medida a fração de massa de fluido remanescente na parede do tubo m após a passagem do gás e proposta uma equação, Equação (1.1), do tipo:

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

que relacionava m com a velocidade da ponta da bolha da interface entre os dois fluidos U e a velocidade média do escoamento \bar{u} . Além disso, os autores sugeriram uma relação entre a fração de massa perdida e o número de capilaridade.

Bretherton (1961) estudou o deslocamento de longas bolhas de ar ao longo de tubos capilares preenchidos com líquidos viscosos. O trabalho teórico e experimental foi dividido em dois problemas distintos: no primeiro, o tubo possuía um raio suficientemente pequeno, tal que esforços gravitacionais podiam ser desprezados, e no segundo era feita a análise do escoamento das bolhas em tubos verticais com uma das extremidades seladas. O autor propôs uma relação teórica para a fração de massa perdida na parede do tubo, válida para baixos números de capilaridade.

Taylor, no mesmo ano, pesquisou a respeito da dependência da fração de massa perdida m com o número de capilaridade Ca definido pela Equação (1.2) como:

$$Ca \equiv \frac{\mu U}{\sigma} \quad (1.2)$$

Onde μ é a viscosidade, σ a tensão superficial e U a velocidade da bolha. O autor também utilizou gás para remover fluidos newtonianos em tubos capilares e mostrou que a relação entre a massa perdida e Ca proposta por Fairbrothers & Stubbs (1935) e Bretherton (1961), $m = Ca^{0,5}$, só era válida para baixos números de capilaridade e de m . A saber, $0 < Ca < 0,09$. Quando $Ca > 0,09$, o valor de m é menor do que o previsto pela equação proposta e quando $Ca > 1$ a equação prevê $m > 1$ o que não tem sentido físico. Taylor (1961) contribuiu ainda, indicando que a quantidade de líquido depositada da parede do tubo capilar crescia em função da velocidade da

interface até que m tendesse a um valor assintótico de 0,56 quando a capilaridade aproximasse de 2. O autor confirmou que problema analisado era governado pelo número de capilaridade Ca .

Taylor (1961) também apresentou uma análise qualitativa em relação aos regimes de escoamento, considerando um referencial fixo na ponta da bolha e três possíveis padrões de linha de corrente. Quando o número de capilaridade é alto, $Ca \gg 1$, não ocorre recirculação do fluido deslocado e só é visualizado um ponto de estagnação na bolha. Para baixos valores de Ca , $Ca \ll 1$, a recirculação do fluido deslocado atinge a interface com o fluido deslocador e um anel de estagnação é formado na interface. O terceiro padrão é um de transição, onde apresenta a recirculação do fluido deslocado e dois pontos de estagnação distantes entre si. O autor ainda inseriu o conceito de fração de massa crítica m_c sendo essa fração relativa à massa aderida à parede do tubo para qual se inicia o regime de transição (no caso estudado, $m_c = 0,50$). Sendo essa fração relativa ao deslocamento de líquido por um gás em um tubo capilar. A Figura 1.2 ilustra os três regimes de escoamento propostos pelo autor.

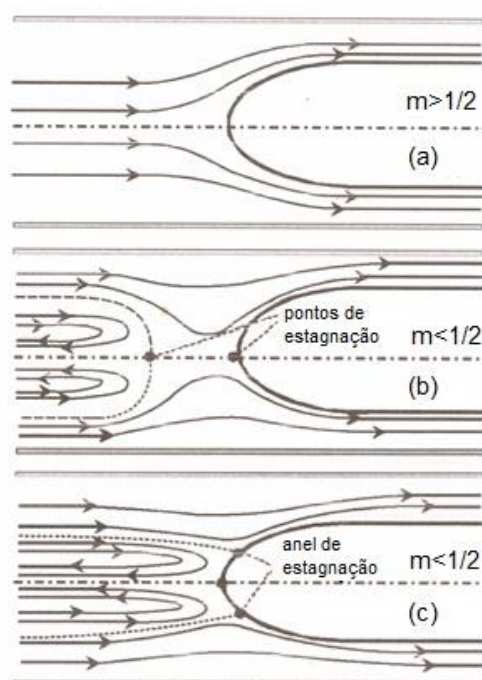


Figura 1.2- Regimes de escoamento propostos por Taylor (1961) para um deslocamento gás-líquido. a) by-pass, b) regime de transição, c) recirculação completa. Fonte: Taylor (1961).

Cox (1962) trabalhando no mesmo problema de Taylor (1961) observou que m atingia um valor assintótico de 0,60 quando Ca se aproximava de 10, notando uma boa concordância com as conclusões obtidas por Bretherton (1961), para $0,001 < Ca < 0,01$. Em 1964, o mesmo autor iniciou um trabalho de visualização de linhas de corrente a fim de checar a validade dos padrões propostos anteriormente por Taylor (1961) e concluiu que eles só poderiam ser confirmados para casos extremos, onde $Ca \gg 1$ ou $Ca \ll 1$, sem prever nenhum padrão de transição. Além disso, ele observou que a bolha provocava apenas uma perturbação local no escoamento, sendo a mesma da ordem de $1,5 D$, onde D é o diâmetro do tubo.

Investigações numéricas com o objetivo de reproduzir Taylor (1961) e estendê-lo considerando a injeção de bolhas de tamanhos infinitos podem ser encontradas mais recentemente no trabalho de Feng (2009). Outra linha geral, frequentemente estudada é o deslocamento de fluidos não newtonianos “de diferentes naturezas” por um gás, como reportado por Huzyak & Koelling (1997); Dimakopoulos & Tsamopoulos (2003, 2007); Lee et al. (2002); Soares et al. (2006); de Souza Mendes et al. (2007) e Sousa et al. (2007).

Para compreender a respeito dos estudos de alguns desses autores, pode-se citar o trabalho de Dimakopoulos & Tsamopoulos (2007) que versaram sobre o deslocamento de fluidos newtonianos e viscoplásticos por ar em geometrias complexas (tubos cilíndricos com expansões e contrações). Os autores concluíram que a viscoplasticidade tende a atrasar a penetração de gás e a aplainar a frente da bolha, reduzindo a espessura da camada de fluido depositada. Eles também observaram que os efeitos de inércia são importantes sobretudo em escoamentos de fluidos newtonianos, auxiliando na entrada da bolha e na remoção de massa, ou seja, ajudando na redução de m , contudo estes efeitos somente foram observados para elevados valores de número de Reynolds.

O deslocamento de líquidos viscoplásticos por injeção de gás em tubos capilares também foi estudado por de Souza Mendes et al. (2007). Entre os resultados obtidos foi observado que para valores de vazão abaixo de um determinado valor crítico, o líquido viscoplástico é totalmente deslocado pelo gás injetado. Segundo eles, uma possível interpretação para esse comportamento pode estar relacionada com a transição que ocorre quando a tensão na parede se aproxima da tensão limite de

escoamento do fluido viscoplástico em um escoamento laminar completamente desenvolvido em tubos.

Hodges et al. (2004) estenderam o trabalho teórico de Bretherton (1961), considerando longas bolhas de fluidos viscosos injetadas no tubo e analisaram os efeitos da relação de viscosidade e número de capilaridade Ca sob a espessura da massa de fluido deslocado, até um limite pequeno de Ca ($Ca \ll 1$). Para os casos estudados os pares de fluidos eram imiscíveis e a razão de viscosidades foi denotada λ . Os autores verificaram que a espessura do filme depositado aumenta por um fator de $4^{2/3}$ até um valor constante, quando $Ca^{-1/3} \ll \lambda \ll Ca^{-2/3}$ e seguida cai por um fator de $2^{2/3}$ quando $\lambda \rightarrow \infty$.

Estudos envolvendo o deslocamento de um líquido por outro são menos frequentes que a remoção de um líquido por gás. Mas já em 1963, Goldsmith & Mason apresentaram uma publicação onde era feita uma análise teórica e experimental da quantidade de líquido depositada na parede devido ao deslocamento de uma gota de líquido avaliando diferentes parâmetros com uso de dois fluidos newtonianos. Nos seus experimentos, o fluido deslocador era uma longa bolha de um fluido viscoso. Os pesquisadores demonstraram que essa fração de massa remanescente na parede do tubo aumentava com a diminuição da razão de viscosidades N_μ , definida pela Equação (1.3).

$$N_\mu \equiv \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (1.3)$$

Onde μ_1 é a viscosidade do fluido removedor e μ_2 a viscosidade do fluido deslocado. O efeito da velocidade da bolha sobre a forma e a espessura da película do fluido original remanescente na parede do tubo também foi analisado por esses autores. Eles ainda investigaram brevemente, a respeito da quebra das bolhas e da não uniformidade dos filmes de líquido remanescente na parede do tubo. Olbricht & Kung (1993) pesquisaram a respeito da forma, da deformação e da quebra de uma bolha que escoava por um tubo capilar previamente preenchido com outro líquido imiscível. Os autores observaram em altas razões de viscosidades a presença de uma bolha alongada na direção axial que se rompia a partir de um número de capilaridade crítico, tal como dispôs Goldsmith & Manson (1963), e ainda, que bolhas com baixas viscosidades começavam a se romper através da penetração

dessas no fluido com maior viscosidade. Para todos os casos estudados o tamanho da gota era da mesma ordem de grandeza do diâmetro do tubo.

Em uma abordagem mais prática, Haut (1978) mostrou que a densidade era um parâmetro importante e que os efeitos relacionados a ela não podiam ser desprezados, já que no caso da pesquisa, a diferença entre as densidades do fluido de perfuração e da pasta de cimento fazia com que fosse gerada uma instabilidade na interface entre os mesmos. Ressalta-se que o perfil de velocidade não deve ser confundido com o perfil da interface em um processo de deslocamento entre fluidos. O perfil de velocidade precisa ser analisado longe da fronteira dos fluidos e não varia com o tempo em regime permanente. Já na região fronteira, o perfil varia bastante, devido a instabilidades e recirculações. O mesmo autor, em parceria com Crook 1981, verificou em laboratório que espaçadores de baixa densidade e viscosidade melhoravam a remoção da lama de perfuração.

Cachile et. al. (1996) 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 viscosidade e/ou baixos números de capilaridade. Em outros casos a espessura diminui quanto mais longe da frente da interface.

Bakhtiyarov & Siginer (1996) investigaram a respeito do deslocamento líquido-líquido em tubos cilíndricos horizontais sob regime laminar tanto do ponto de vista experimental quanto teórico e ressaltaram que o tempo que o fluido deslocado leva para sair do tubo (*breakthrough time*) aumentava com a diminuição da razão de viscosidades, na taxa de cisalhamento zero.

Schleizer & Bonnecaze (1999) examinaram uma geometria diferente e buscaram compreender o comportamento dinâmico e a estabilidade de uma gota bidimensional imiscível submetida a escoamento em cisalhamento induzido por pressão entre placas paralelas. Sob essas circunstâncias, o tamanho da gota e a deformação da interface aumentavam com o número de capilaridade e a razão de viscosidades.

Soares et al. (2005) analisaram, através de simulações numéricas e experimentos, o deslocamento de um líquido viscoso por uma longa bolha de um outro líquido

viscoso em um tubo capilar para uma larga faixa de parâmetros governantes. As previsões teóricas desses autores mostraram o efeito de diferentes parâmetros na configuração da interface e na espessura da camada de líquido deslocado deixada nas paredes e os resultados apresentados tinham uma tendência similar aos apresentados por Goldsmith & Mason (1963). No mesmo trabalho, os autores relacionaram a fração de massa depositada na parede do tubo ao número de capilaridade e a razão de viscosidades, para baixos números de Reynolds. É válido lembrar que as análises experimentais da fração de massa depositada realizadas por esses autores foram feitas considerando uma relação entre volumes, a partir de uma imagem. A essa fração ao longo do atual trabalho será dado o nome de fração geométrica de massa residual ou fração geométrica de massa perdida e a mesma será representada por m_g . Para essa fração geométrica de massa perdida m_g Soares et al. (2005) examinaram o problema do ponto de vista numérico e experimental e mostraram uma boa concordância entre as duas abordagens.

Soares & Thompson (2009) fizeram uma análise teórica e numérica e comprovaram que os três padrões de linha de corrente previstos por Taylor (1961) só ocorrem quando a relação de viscosidades, definida pela Equação (1.3), é maior que dois. Os pesquisadores ainda sugeriram formas alternativas de calcular m_g , com base no gradiente de pressão em regiões completamente desenvolvidas e na razão de viscosidades.

Outros trabalhos encontrados na literatura incluem o estudo a respeito do deslocamento de fluidos miscíveis tal como os de Petitjeans & Maxworthy (1996) que investigaram experimentalmente o deslocamento de fluidos miscíveis em tubos e verificaram o impacto da razão de viscosidades, do número de Peclet e da relação entre as forças viscosas e as forças de corpo sobre a parcela de massa depositada nas paredes. Os mesmos também observaram que a fração mássica depositada no tubo diminuiu com a redução da razão de viscosidades e que, para elevados valores do número de Peclet, $Pe > 1000$, surge uma nítida interface entre os fluidos. Os autores Vanaparthi & Meiburg (2008) também contribuíram com pesquisas envolvendo fluidos miscíveis.

Tratando-se do deslocamento de um líquido por outro, em diferentes geometrias, existem ainda estudos que incluem o uso de líquidos não newtonianos e

correlaciona à influência de parâmetros reológicos com a fração de massa de líquido depositada.

Allouche et al. (2000) exploraram a possibilidade do surgimento de uma camada residual de massa depositada nas paredes de um canal plano, durante a substituição de um fluido viscoplástico por outro. Evidenciaram que é possível estimar a espessura máxima dessa camada e definir um valor crítico no qual o fluido começa a recircular junto à frente de deslocamento. Além disso, notaram que a camada residual é mais bem definida em escoamentos lentos, já que a interface comum desestabiliza em altas velocidades.

Dutra et al. (2005) previram numericamente as operações de substituição de um fluido por outro em um poço. Eles trataram do deslocamento de fluidos não newtonianos por fluidos newtonianos e vice-versa e avaliaram os efeitos da diferença de densidade e a reologia dos líquidos. Como as características reológicas exercem grande influência no processo, principalmente na razão de viscosidades, exige-se, que o comportamento não newtoniano dos líquidos seja bem conhecido, o que foi bem avaliado por esses autores.

Abordando um assunto mais prático, Celnik (2008) fez uma análise qualitativa da substituição de fluidos no espaço anular de um poço vertical, por meio da interface formada entre eles. Foi verificado que para os casos estudados (fluido mais viscoso deslocando um menos viscoso e vice-versa), quanto menor a vazão, mais plana e estável era a fronteira entre os fluidos. Uma importante contribuição da autora foi a visualização do experimento, com a utilização de micro partículas que refletiam a luz incidida. A autora destaca ser essencial encontrar pares de fluidos com índices de refração muito próximos não só entre si, como também ao do material da tubulação.

Soares et al. (2008) ampliaram o trabalho descrito em Soares et al. (2005) estudando o deslocamento de líquidos viscoelásticos. Os autores analisaram experimentalmente o comportamento da fração de massa depositada na parede de um tubo capilar e a geometria da interface da bolha em função do número de capilaridade quando utilizados líquidos viscoelásticos para atuar tanto como fluido removedor como quanto fluido deslocado. Os efeitos viscoelásticos foram analisados confrontando os resultados com os apresentados no deslocamento de dois líquidos

newtonianos. Foram preparadas duas soluções viscoelásticas. Quando utilizada a solução mais concentrada como líquido deslocado sendo recuperada por um líquido newtoniano, foi observada uma maior fração de massa depositada na parede do tubo capilar comparada ao caso de deslocamento de um líquido newtoniano por outro. Os resultados ainda concordaram qualitativamente com os apresentados por Huzyak & Koelling (1997) que faziam uso de líquidos viscoelásticos sendo recuperados por gás.

O presente trabalho revisita a abordagem de Taylor (1961) para analisar experimentalmente o deslocamento de um fluido por outro em um tubo capilar. Como o fluido deslocador é um líquido, é investigado como as quantidades de massa depositada m_e e como a fração geométrica de massa depositada m_g são afetadas pela relação de viscosidades e pelo número de capilaridade.

1.4 Caracterização do problema

O presente trabalho analisa a fração de massa de óleo depositada em uma única garganta do meio poroso após a passagem de um líquido newtoniano. Uma aproximação do processo de recuperação em uma garganta é feita através da injeção de materiais newtonianos para recuperação de óleo em um tubo capilar.

Nesse tipo de escoamento, parâmetros como número de capilaridade e a razão de viscosidades dos fluidos, baseados na escala do diâmetro do poro, são essenciais à análise de massa depositada na parede. Além disso, conhecer as propriedades físico-químicas dos fluidos a serem injetados bem como as do fluido a ser recuperado do capilar e o comportamento e interação entre eles em todas as fases do processo são fundamentais para o entendimento do problema.

O deslocamento de um fluido por outro em um tubo capilar é um problema que é frequentemente observado em um grande número de processos industriais e biológicos. O caso de líquidos imiscíveis onde o fluido deslocado molha a parede do tubo é de particular interesse no presente estudo. Nesse caso o fluido injetado ocupa o meio do capilar enquanto o fluido a ser recuperado forma uma camada aderida a parede interna do tubo. A Figura 1.3 representa um modelo utilizado na análise do problema do deslocamento de fluidos. Note que R_o é o raio do tubo e R_b é

o raio da bolha semi - infinita formada pelo fluido deslocador. A diferença entre os raios, R_o e R_b , é a espessura do filme líquido depositado na parede do tubo durante o processo.

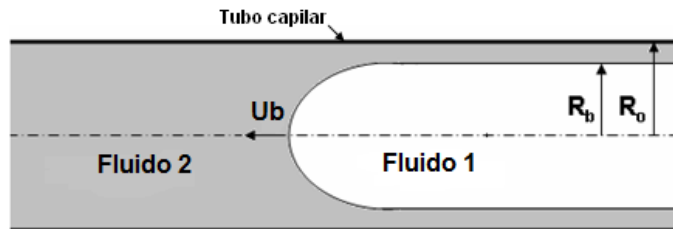


Figura 1.3 – Representação do problema.

No caso de deslocamento de fluidos imiscíveis em tubos capilares, a tensão interfacial entre os dois líquidos envolvidos tem um importante papel na dinâmica do escoamento. Em geral, as principais quantidades de interesse é a “fração” de massa que permanece presa à parede interna do tubo, quantidade comumente associada com a eficiência do deslocamento do fluido. A eficiência do deslocamento da massa é usualmente relacionada com a quantidade de massa perdida, m_e , dada pela Equação (1.4):

$$m_e = \frac{\text{fração de massa remanescente na parede}}{\text{massa total}} = 1 - \frac{\text{massa recuperada}}{\text{massa total}} = \frac{U_b - \bar{U}_2}{U_b} \quad (1.4)$$

Onde U_b é a velocidade da bolha e \bar{U}_2 é a velocidade média do fluido deslocado (fluido 2) longe suficientemente da frente do fluido injetado (fluido 1).

Outra forma de calcular a fração de massa que fica depositada na parede do tubo é através da relação entre volumes, nesse caso, chamamos no presente trabalho, de fração geométrica de massa residual, ou fração geométrica de massa perdida, m_g . Que pode ser definida pela seguinte Equação (1.5):

$$m_g = 1 - \frac{R_b^2}{R_o^2} \quad (1.5)$$

Para o deslocamento gás-líquido verifica-se que m_e coincide com m_g . Entretanto, no deslocamento líquido-líquido essas quantidades são diferentes.

O teste se dá sucintamente da seguinte forma: o capilar é inicialmente preenchido com o líquido 2 e em seguida esse líquido é deslocado pelo líquido 1 que forma uma

longa bolha com velocidade constante U_b . O líquido 2 utilizado foi o óleo de soja comercial e o líquido 1 variou, mas basicamente era formado a partir de soluções de polietilenoglicol (PEG). Tentou-se conduzir os experimentos de forma que as seguintes condições fossem garantidas:

- 1- Inércia desprezível;
- 2- Escoamento laminar;
- 3- Fluido incompressível;
- 4- Tensão interfacial σ constante;
- 5- Condição de impermeabilidade;
- 6- Escoamento desenvolvido em uma seção suficientemente distante da ponta da bolha;
- 7- Fluidos imiscíveis.

Um aspecto importante desse escoamento é que os efeitos de inércia podem ser desprezados já que os resultados experimentais foram obtidos para baixos números de Reynolds. Os testes foram conduzidos de forma que a bolha não sofresse aceleração (U_b constante) o que mantinha a geometria da interface entre os dois fluidos fixa. Uma das condições desejáveis é que os efeitos de empuxo sejam negligenciáveis. Essa condição é atendida quando os dois líquidos de trabalho apresentam a mesma massa específica. Como as massas específicas dos fluidos utilizados apresentavam diferenças, esses efeitos não puderam ser completamente evitados.

Em todos os casos estudados a viscosidade do fluido removedor não pôde ser desprezada em face da viscosidade do fluido deslocado. A razão de viscosidades $N\mu$ definida pela Equação (1.3) surge então como um parâmetro de interesse. Salienta-se que em todos os testes o fluido que apresentava a menor viscosidade deslocava aquele que apresentava a maior. Outro adimensional que interfere diretamente no controle da espessura de filme líquido depositado na parede do tubo capilar é o número de capilaridade Ca que foi definido pela Equação (1.2). Diante do apresentado nessa seção os principais objetivos dessa pesquisa são obter as frações de massa depositada do fluido 2 na parede do tubo capilar, através das Equações (1.4) e (1.5) em função do número de capilaridade e da razão de viscosidades.

CAPÍTULO 2 FORMULAÇÃO FÍSICA

2.1 Análise dimensional

A análise dimensional é uma importante ferramenta utilizada quando se deseja reproduzir uma determinada operação de campo em uma planta experimental de tamanho reduzido e que represente os fenômenos que aconteceriam na situação real. Os parâmetros de interesse são obtidos, essencialmente, através da adimensionalização das principais variáveis presentes nas equações de conservação da massa e da quantidade de movimento linear, no formato vetorial, e etc. Tais parâmetros são utilizados na correlação dos dados, permitindo relacionar as informações do escoamento real e às obtidas em laboratório. A análise dimensional é uma ferramenta de grande valia já que contribui na redução do número de variáveis a serem consideradas.

Para adimensionalizar as equações governantes do problema, escolheu-se o raio do tubo R_o , como comprimento característico e a velocidade da bolha U_b , como a velocidade característica e juntos com as propriedades do fluido 2 (deslocado) pode-se seguir um procedimento tradicional para deduzir as formas adimensionais das equações de governo, ou seja, a da continuidade, a do balanço do momento (conservação da quantidade de movimento), impermeabilidade da interface e balanço na interface, que são dadas por:

- Continuidade no fluido 1 e no fluido 2 (Equação 2.1):

$$\nabla^* \cdot v_1^* = 0, \nabla^* \cdot v_2^* = 0 \quad (2.1)$$

- Continuidade na interface (Equação 2.2):

$$v_1^* = v_2^* = v_t^* \quad (2.2)$$

- Balanço do momento no fluido 2 (Equação 2.3):

$$Re \left(\frac{\partial v_2^*}{\partial t} + v_2^* \cdot \nabla^* v_2^* \right) = - \nabla^* P_2^* + \nabla^{*2} v_2^* \quad (2.3)$$

- Balanço do momento no fluido 1 (Equação 2.4):

$$Re \left(\frac{\partial v_1^*}{\partial t} + v_1^* \cdot \nabla^* v_1^* \right) = - \nabla^* \left[P_1^* + \left(\frac{1}{N_\rho} - 1 \right) z_1^* \right] N_\rho + \frac{1}{N_\mu} N_\rho \nabla^{*2} v_1^* \quad (2.4)$$

- Balanço do momento na interface (Equação 2.5):

$$n \left[P_1^* + \left(\frac{1}{N_\rho} - 1 \right) z_1^* - P_2^* \right] + n \cdot \left(S_2^* - \frac{1}{N_\mu} S_1^* \right) = \frac{1}{Ca} \frac{1}{R_m^*} n \quad (2.5)$$

Para as variáveis adimensionais definidas como (Equação 2.6; 2.7; 2.8; 2.9; 2.10):

$$v^* = \frac{v}{U_b} \quad (2.6)$$

$$P^* = \frac{p + \rho_2 g z}{\mu_2 U_b / R_o} \quad (2.7)$$

$$S^* = \frac{S R_o}{U_b} \quad (2.8)$$

$$R_m^* = \frac{R_m}{R_o} \quad (2.9)$$

$$z^* = \frac{\rho_2 g z}{\mu_2 U_b / R_o} \quad (2.10)$$

Sendo v^* a velocidade adimensional, P^* a pressão modificada, S^* o tensor taxa de deformação adimensional, R_m^* o raio de curvatura médio adimensional e z^* a altura na direção da gravidade.

Os novos números adimensionais além da razão de viscosidades (Equação 1.3) e do número de capilaridade (Equação 1.2) são definidos como (Equação 2.11; 2.12):

$$Re = \frac{\rho_2 U_b R_o}{\mu_2} \quad (2.11)$$

$$N_\rho = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (2.12)$$

Ou seja, para o caso do escoamento envolvendo dois fluidos newtonianos, os parâmetros adimensionais que governam o problema são: o número de Reynolds (Equação 2.11) e a razão de densidades (Equação 2.12) além dos adimensionais já citados.

As equações de governo acima mostram que o problema do deslocamento líquido-líquido pode ser simplificado quando se considera que a razão de massas específicas $N\rho = 1$, ou seja, quando se trabalha com fluidos com mesma massa específica. Assumiu-se essa premissa no resto da presente pesquisa e foram escolhidos líquidos com massas específicas próximas uma ao do outro para execução do procedimento experimental que será detalhado no capítulo a seguir. Outra condição simplificadora para o problema é $Re \rightarrow 0$, ou seja, que os efeitos de inércia sejam desprezíveis. Tentou-se conduzir os experimentos para que ambas as condições pudessem ser atendidas, tanto quanto possível.

A partir dessas considerações a Equação (2.3), (2.4) e (2.5) podem ser reescritas como as Equações (2.13) (2.14) e (2.15) a seguir:

$$0 = -\nabla^* P_2^* + \nabla^{*2} v_2^* \quad (2.13)$$

$$0 = -\nabla^* [P_1^*] + \frac{1}{N_\mu} \nabla^{*2} v_1^* \quad (2.14)$$

$$n[P_1^* - P_2^*] + n \left(S_2^* - \frac{1}{N_\mu} S_1^* \right) = \frac{1}{Ca} \frac{1}{R_m^*} n \quad (2.15)$$

CAPÍTULO 3 ABORDAGEM EXPERIMENTAL

O capítulo foi subdividido em três seções. A primeira trata da seleção e preparo dos fluidos de trabalho, a segunda a respeito da caracterização desses fluidos, em seguida, detalha-se o experimento realizado para obtenção dos resultados experimentais.

3.1 Seleção e preparo dos fluidos

Antes de iniciar a pesquisa é necessário selecionar os pares de líquidos a serem utilizados nos testes. Opta-se por pares de líquidos com comportamento newtoniano, para que as análises das frações de massas perdidas estejam fundamentadas apenas em função da razão de viscosidades entre os líquidos e relacionadas ao número de capilaridade.

Além dos fluidos utilizados apresentarem comportamento newtoniano, os pares de fluidos devem ser imiscíveis, ter massas específicas semelhantes, a fim de minimizar os efeitos relacionados ao empuxo e índices de refração diferentes para que a interface da bolha formada entre eles durante o escoamento possa ser identificada e fotografada. Além disso, a tensão interfacial entre eles deve ser baixa para que maiores números de capilaridade sejam atingidos. Os fluidos ainda precisam apresentar razões de viscosidade com valores próximos aos já publicados por outros autores, para que os resultados possam ser comparados. Outros fatores como: facilidade na obtenção e possibilidade de obter o mesmo fluido seguindo um procedimento padrão também são quesitos que devem ser avaliados na escolha dos pares de fluidos. Para a realização dos testes são selecionados pares de fluidos que atendam a todas as premissas anteriormente citadas.

O fluido deslocado, fluido 2, é o óleo de soja comercial e não requer nenhum preparo adicional, exceto cuidados com armazenamento, como manutenção temperatura de 25°C e boa vedação para não sofrer processo de oxidação. A embalagem é aberta, as propriedades características do óleo medidas e o mesmo é posto no reservatório “A” (ilustrado em seção posterior). Após três dias as

propriedades são novamente medidas. Para o óleo de soja comercial, só são apresentadas variações representativas nas propriedades após sete dias, quando então o mesmo deve ser completamente retirado do reservatório “A”. O reservatório é então limpo e um novo óleo da mesma marca é adicionado, depois de medidas as propriedades para verificar se os valores das mesmas são iguais aos apresentados para o óleo anterior. Porém, para evitar problemas causados devido a alterações nos valores da densidade e viscosidade, o óleo de soja só é usado por um período máximo de três dias.

Para o fluido deslocador são utilizados dois pares de fluidos: uma solução de água e etanol e uma solução de água e polietilenoglicol (PEG) mais etanol. Para o preparo da solução de água e etanol é adicionado à água um percentual em volume de 50% de etanol. Para isso, em uma proveta de 1000 mL, completamente limpa e seca, adiciona-se 600 mL de água deionizada e 300 mL de etanol, também conhecido como álcool etílico, 95% P.A. A solução é misturada manualmente com auxílio de um bastão, suas propriedades medidas e a mesma é imediatamente colocada no reservatório “B”. A quantidade é suficiente para encher o reservatório, sobrar uma quantidade para completá-lo ao final de cada teste e medir as propriedades. Esse fluido é utilizado para validar a bancada. O preparo é simples e rápido e os cuidados incluem: vidrarias utilizadas completamente limpas e temperatura mantida a 25°C.

O outro fluido utilizado como removedor é uma solução de água e PEG. Após a mistura desses dois componentes é adicionado o etanol a fim de controlar a densidade da solução. Como são desejadas razões de viscosidades diferentes, o percentual de PEG adicionado à água varia. Com a variação da concentração de PEG, os valores das massas específicas também são alterados e são relativamente altos se comparados ao óleo de soja. Para tentar mantê-los o mais próximo do valor apresentado para massa específica do óleo de soja, evitando efeitos relacionados ao empuxo devido à diferença dos valores entre as massas específicas do par de fluidos, é adicionado etanol. A principal função desse álcool é diminuir o valor de massa específica da solução aproximando-o do valor apresentado pelo óleo de soja. O ideal é que esses valores sejam iguais, porém existe uma grande dificuldade na obtenção de fluidos imiscíveis com mesma massa específica, para as razões de viscosidades desejadas e que ainda atendam os demais requisitos, tais como: índices de refração diferentes e comportamento newtoniano.

É válido lembrar que para todos os fluidos utilizados, apesar do índice de refração não ter sido medido, é possível ver claramente a interface da bolha sem adição de corante, já que todos os fluidos utilizados como removedores apresentam ausência de cor, são transparentes, e o óleo de soja utilizado em todos os testes como fluido deslocado apresenta-se naturalmente em um tom de amarelo. Testes prévios com a presença de corantes adicionado a um dos fluidos tornou os pares de fluidos miscíveis, alterando o foco do presente trabalho.

O procedimento padrão para o preparo da solução de líquidos deslocadores é o seguinte: em uma balança são pesados 500 g de água deionizada da empresa. Adiciona-se então, o percentual em massa desejado de polietilenoglicol ATPEG, de massa molar igual a 6000 g/mol, de grau USP, da empresa OXITENO. Para os testes realizados, utiliza-se um percentual de 5, 10, 30 e 70% em massa. Ou seja, para o percentual de 5% em massa, são adicionados a 500 g de água deionizada, 25g de PEG; para o percentual de 10% em massa, são adicionados a 500 g de água deionizada, 50 g de PEG; para o de 30%, 150 g de PEG e para o de 70%, 350 g de PEG são adicionados a 500 g de água.

O polietilenoglicol apresenta-se como sólido branco e é totalmente dissolvido em água para o preparo da solução prévia que é utilizada. Para isso, depois de adicionado à água deionizada os mesmos passam por um processo de mistura. Utiliza-se um agitador magnético HOTLAB II para obtenção de uma solução homogênea. A Figura 3.1 ilustra o processo de homogeneização da solução de PEG em água 70% peso/peso.

O tempo de mistura varia de 15 minutos, na solução menos concentrada, até uma hora, na solução mais concentrada. A solução preparada é então retirada do agitador e fica em repouso por um período de 15 minutos, para que todas microbolhas de ar sejam eliminadas. Isso é importante, para que ao se fazer a adição volumétrica de etanol não se forme uma espuma no menisco entre os dois fluidos, alterando assim o real volume de álcool adicionado.

Após o preparo da solução de PEG, são medidos 500 mL da mesma em uma proveta e a esse volume de solução é adicionado o etanol 95% P.A. O percentual

volumétrico de etanol varia com a razão de viscosidades desejada. A tabela a seguir (Tabela 3.1) resume esses percentuais.



Figura 3.1 - Preparo da solução de PEG 70% peso / peso, início e final da homogeneização da mistura.

Tabela 3.1 - Composição dos líquidos removedores em função da razão de viscosidades.

Amostra	Composição dos fluidos	Razão de viscosidades ($N\mu$)
A	água+ etanol 50% V/V	18,22
B	(água e PEG 05% p/p) + etanol 70% V/V	12,21
C	(água e PEG 10% p/p) + etanol 70% V/V	8,99
D	(água e PEG 30% p/p) + etanol 90% V/V	4,02
E	(água e PEG 70% p/p) + etanol 100% V/V	1,82

Para o fluido B, em 500 mL de solução de PEG 5% p/p é adicionado o volume de 350 mL de etanol. Para o fluido C em 500 mL de solução de PEG 10% p/p é

adicionado o volume de 350 mL de etanol. Já para o fluido D, em 500 mL de solução de PEG 30% p/p é adicionado o volume de 450 mL de etanol e para o fluido E, em 500 mL de solução de PEG 70% p/p é adicionado o volume de 500 mL de etanol. Para o fluido A, sua composição volumétrica já foi descrita anteriormente.

Após o preparo desses fluidos, verifica-se se os mesmos realmente são imiscíveis em óleo de soja. Em uma proveta, adiciona-se o volume de 2 mL de uma das soluções e o mesmo volume de óleo de soja. Foi verificado que o menisco formado no contato entre os pares de fluidos (solução de PEG mais etanol e óleo de soja) apresenta-se de forma regular para todas as amostras e que ainda não havia formação de emulsão, ou micelas ou ainda qualquer alteração no volume adicionado de cada um mesmo após 24 horas. Passado esse tempo, ainda se encontravam os 2 mL de óleo de soja e os 2 mL de cada solução de PEG mais etanol devidamente separados dentro da proveta, comprovando assim a imiscibilidade entre os dois.

Após o preparo dos fluidos e o teste descrito no parágrafo anterior, são medidas a massa específica, a tensão interfacial de cada amostra com o óleo de soja e a viscosidade de cada uma. Com os valores das propriedades medidos, o fluido é então estocado no reservatório "B".

Uma nota importante é que cada fluido desses utilizados (A, B, C, D, E) só é preparado quando o teste na razão de viscosidades desejada será realizado por apresentarem em sua composição o etanol que é volátil. Essa medida minimiza os efeitos relacionados à evaporação dos solventes, no caso água deionizada e o próprio etanol e conseqüentemente evitam-se alterações nas composições dos fluidos. Foi observado que após três dias, já havia variações nas propriedades de cada um deles. A solução em uso no momento do teste (A, B, C, D ou E) é então refeita a cada três dias e suas propriedades novamente medidas para garantir que se mantenham constantes de acordo com a forma de preparo descrita. A solução em uso é então inserida no reservatório "B".

3.2 Caracterização das amostras

Após preparadas, as amostras necessitam ser caracterizadas. Para isso, três propriedades são cruciais para elaboração dessa pesquisa. A massa específica e a

viscosidade tanto dos fluidos deslocador quanto deslocado e também a tensão interfacial entre cada um dos líquidos preparados com o óleo de soja.

Quando se deseja descrever o comportamento mecânico dos materiais envolvidos no problema de deslocamento de fluidos existem duas equações fundamentais: a equação constitutiva do material e a equação constitutiva da interface entre os fluidos. Para definir a equação constitutiva do material necessita-se que sejam determinadas as funções materiais que caracterizam o fluido. Quando o fluido é newtoniano, o único parâmetro material é a viscosidade do mesmo, que para as mesmas condições de pressão e temperatura independe do tipo de escoamento e apresenta sempre o mesmo valor. Já para determinar a equação constitutiva da interface é necessário obter a tensão que surge do contato entre o par de fluidos de trabalho, nesse caso, a tensão interfacial entre o óleo de soja e as demais soluções mencionadas anteriormente. A necessidade de determinação da massa específica se faz necessária para compor a viscosidade dinâmica dos fluidos de interesse e principalmente para evitar os efeitos de empuxo por razões já previamente explicadas. A seguir a descrição dos métodos utilizados para obtenção dos valores das propriedades.

3.2.1 Viscosímetro - testes de viscosidade

Viscosímetros são dispositivos adequados quando se deseja medir a viscosidade de um líquido a uma taxa de cisalhamento constante. A Figura 3.2 mostra o diagrama esquemático de um viscosímetro do tipo Cannon-Fenske.

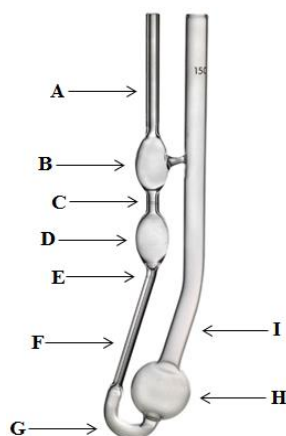


Figura 3.2 - Representação esquemática do viscosímetro utilizado.

A amostra é inserida no viscosímetro através do ramo I até preencher completamente o bulbo H. O viscosímetro é fixado e imerso no banho termostático o qual mantém a temperatura fixa em 25°C. Espera-se 15 minutos para que a temperatura do conjunto líquido viscosímetro atinja e estabilize em 25°C. Esse tempo de espera também é necessário para que ocorra a eliminação completa de micro bolhas as quais interferem na medida. O suporte no qual o viscosímetro é fixado mantém os ramos A e I na posição vertical, o que é um cuidado adicional.

Com auxílio de um pipetador, aplica-se uma sucção no ramo A trazendo a amostra até o bulbo B posicionado acima da marca C. Como todos os fluidos de trabalho escolhidos são fluidos newtonianos, esta distância acima da marca C é indiferente, até porque não é recomendado o uso de viscosímetros capilares do tipo Cannon Fenske para medida de viscosidades de fluidos não newtonianos.

Após esse procedimento é medido o tempo de escoamento, que é determinado permitindo que a amostra escoe pela ação da gravidade livremente. O intervalo de tempo da passagem do menisco do líquido entre C e E é medido com auxílio de um cronômetro e a viscosidade cinemática é então calculada, multiplicando o tempo de escoamento pela constante do viscosímetro. O valor da constante é intrínseco de cada viscosímetro e a escolha dos mesmos está condicionada a faixa de viscosidades a qual se almeja medir.

Com o uso de um viscosímetro do tipo Cannon-Fenske, com a constante adequada para cada líquido é medida a viscosidade cinemática das amostras (A, B, C, D, E) e do óleo de soja para as mesmas condições de pressão e temperatura. Para finalmente obter a viscosidade dinâmica, multiplica-se a viscosidade cinemática de cada líquido por sua devida massa específica, atentando-se para as conversões das medidas. Os valores das massas específicas são obtidos conforme procedimento apresentando a seguir.

3.2.2 Medida da massa específica

A medida da massa específica é realizada em um dos módulos do equipamento da Thermo Scientific (DCA Radian Serie 300, Contact Angle-Surface Tension) que possui um aparato de volume calibrado capaz de fazer essa medida facilmente.

O equipamento é ligado a um banho termostático Thermo Phoenix III C25P, que mantém a temperatura do fluido constante em 25°C. O equipamento também é ligado ao computador e os dados são processados e controlados pelo software Win DCA 32 versão 2.12. A Figura 3.3 ilustra o conjunto.



Figura 3.3 – Equipamento utilizado para medição das densidades dos fluidos.

Para verificar se o equipamento faz essa medida de forma correta, inicialmente é feita a medida da massa específica do óleo de soja utilizando um picnômetro, que é um recipiente com volume calibrado de fábrica. Nesse caso com auxílio de uma balança de precisão de 10^{-3} gramas, mede-se a massa específica do óleo dividindo a massa de óleo pesada pelo volume do recipiente. Os resultados obtidos para densidade do óleo em ambas as formas de medidas foram praticamente iguais.

É importante salientar, porém, que o equipamento eletrônico utilizado deve ser calibrado semanalmente para que não ocorram erros.

3.2.3 Tensiômetro de anel - testes de tensão interfacial

Para medir a tensão superficial na interface entre um par de fluidos pode-se utilizar um tensiômetro de anel. É importante que este equipamento possua um banho termostático a fim de garantir estabilidade da temperatura durante as medições. Para realização da medida dessa propriedade, primeiramente, preenche-se o

cadinho com o líquido do par que possui maior massa específica (líquido 1). Em seguida, mergulha-se o anel medidor neste líquido.

Como o interesse é medir a tensão interfacial entre o líquido 1 e um outro de massa específica menor (líquido 2, no caso óleo de soja), despeja-se cuidadosamente o segundo líquido no cadinho a fim de formar uma interface suave entre os líquidos. Então, o conjunto cadinho, par de líquidos e anel deve permanecer em repouso até que a temperatura se estabilize. É iniciada a medição. A haste que suporta o anel conecta-se a um transdutor de força, enquanto que o cadinho é suportado por uma base que está livre para se deslocar verticalmente. O início da medição se dá pelo deslocamento desta base para baixo. Finalmente, a tensão interfacial é anotada como sendo a máxima tensão registrada pelo transdutor de força até o rompimento da interface.

Para medir a tensão interfacial entre os pares de fluidos de trabalho é utilizado um tensiômetro de anel da marca KSV-SIGMA 702, ilustrado na Figura 3.4. Cuidados adicionais inclui a limpeza do anel utilizado para essa medida, através da queima dos resíduos em uma chama limpa; recipiente onde são adicionados os líquidos completamente limpos, e temperatura do teste igual a 25°C.



Figura 3.4 - Tensiômetro de anel.

3.3 Descrição dos experimentos realizados

Os testes experimentais são realizados em uma bancada experimental, a qual tem sua representação esquemática ilustrada na Figura 3.5.

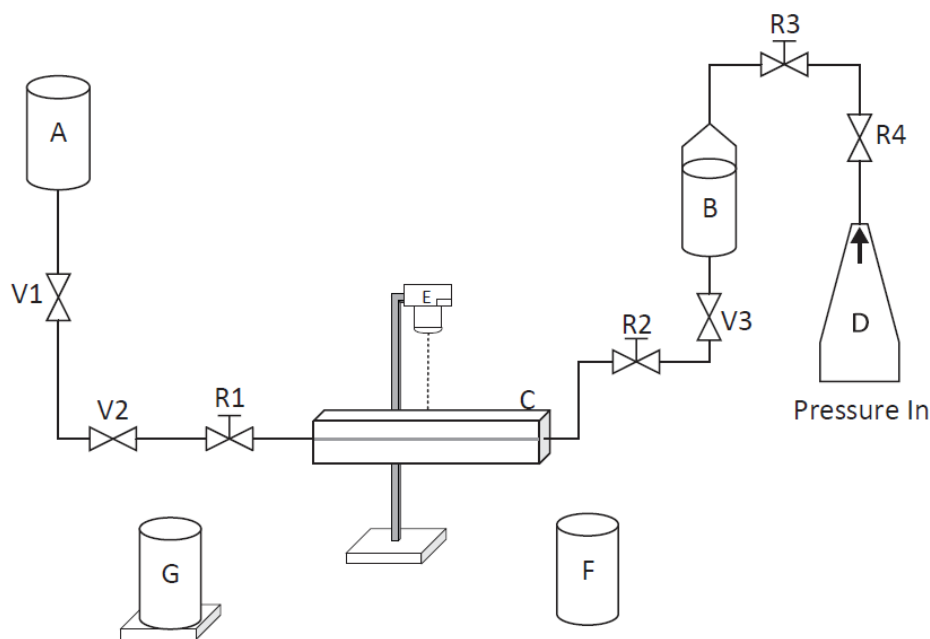


Figura 3.5- Representação esquemática da bancada experimental.

A mesma é composta por reservatórios para o fluido 1 e 2, fluido deslocador e deslocado respectivamente, válvulas de passagem e de controle de vazão, mangueiras, tubo capilar inserido em uma jaqueta, câmara, balança para medir a massa recuperada, béquer de coleta dessa massa, além de suportes e niveladores. O reservatório do fluido 1 é ainda conectado a uma linha de ar comprimido. Todos esses itens que compõem a bancada experimental são detalhados a seguir.

3.3.1 Componentes da bancada experimental

A bancada experimental para realização dos testes efetivos é composta pelos componentes descritos a seguir. Um dos integrantes dessa bancada são os reservatórios de fluidos que são recipientes cilíndricos fabricados em acrílico com a função de armazenar os de líquidos envolvidos no escoamento e no deslocamento de fluidos. Um dos reservatórios é preenchido com o óleo a ser deslocado e o outro com o fluido removedor. O reservatório que contém o líquido removedor ainda é

interligado a uma linha de ar comprimido do laboratório, o que facilita o escoamento e provém a pressão necessária. O controle da quantidade de ar que entra nesse reservatório é feito por um conjunto de válvulas de controle de vazão e de passagem além de um manômetro para monitorar a pressão. O reservatório que contém o óleo é aberto para atmosfera. O tubo capilar é inicialmente preenchido com óleo apenas devido à ação da gravidade. Na parte inferior de cada reservatório há um outro conjunto de válvulas a fim de controlar a vazão e transportar os fluidos através das mangueiras condutoras.

Os líquidos são transportados através de 04 mangueiras. A mangueira que sai do reservatório de líquido removedor, que é conectada diretamente em uma extremidade do tubo capilar. Uma segunda mangueira conecta o reservatório com óleo a um conjunto de válvulas de controle de passagem e de vazão e uma terceira mangueira sai desse conjunto e é conectada no tubo capilar pela outra extremidade. A quarta mangueira faz a conexão entre as válvulas. Existe ainda a mangueira de ar comprimido que liga a linha de ar do reservatório ao conjunto de válvula que se situa antes do reservatório de líquido removedor.

As mangueiras que se conectam diretamente ao tubo capilar devem atender a duas condições: rigidez para não se distenderem devido a pressão e flexibilidade para não causarem torque no capilar de vidro. Além disso, não podem reagir com os fluidos de trabalho nem deixar quaisquer resíduos. Foram escolhidas então mangueiras de silicone. Já a mangueira que é conectada a linha de ar comprimido do reservatório obedece aos quesitos de segurança necessários para suportar alta pressão. Para prendê-las ao tubo capilar são utilizadas braçadeiras metálicas a fim de fixar melhor a conexão e evitar a entrada de bolhas de ar.

O tubo capilar é cilíndrico, fabricado em vidro, com 1,50 m de comprimento, 4 mm de diâmetro externo e 2,40 mm de diâmetro interno. O diâmetro interno necessita ser preciso, para isso, o mesmo foi previamente avaliado segundo método sugerido pelo departamento de metrologia. Para dá suporte ao tubo capilar é utilizada uma jaqueta acrílica que é um tanque em forma de paralelepípedo retângulo. O tubo capilar atravessa esse tanque durante o a realização do experimento. Além disso, a mesma é preenchida com glicerina bidestilada para minimizar os efeitos de reflexão e refração da luz sobre o tubo capilar, auxiliando na visualização da interface entre os

dois líquidos internos ao tubo capilar. A parte superior da jaqueta é aberta para facilitar a manipulação e o preenchimento com glicerina. Para gerenciar o escoamento, utilizam-se válvulas do tipo *on-off*, também conhecidas como válvulas de passagem do tipo globo e válvulas de controle de vazão.

O deslocamento em um tubo finito é um escoamento em regime transiente, já que a resistência ao escoamento diminui à medida que o óleo é expulso do capilar. Uma forma de minimizar a aceleração do par de fluidos dentro do tubo capilar é aumentar a perda de carga como um todo. Isso é feito através da utilização de uma válvula do tipo agulha a qual tem abertura para atmosfera. A restrição da abertura dessa válvula faz com que maior parte da perda de carga fique então concentrada na mesma.

Para medir o tempo de percurso da bolha desde a primeira marcação, a 10 cm da entrada do tubo capilar, até a última, a 45 cm do final do capilar, utiliza-se um cronômetro de precisão de centésimos de segundo. É válido lembrar que é utilizada de uma caneta pincel para fazer marcações de forma a obter trechos com mesmo comprimento no tubo capilar. Desprezam-se os primeiros 10 cm e os últimos 45 cm para evitar os efeitos de borda. No trecho de 1,05 m restantes são feitas essas marcações.

Como toda análise do deslocamento é dado na posição horizontal, para garantir que o conjunto capilar – jaqueta esteja alinhado e nivelado são utilizados niveladores presos ao suporte universal com essa finalidade. A haste ou suporte universal é constituída por uma base retangular e um cano vertical, normalmente fabricada em metal, utilizada para dar suporte e fixar aparatos e equipamentos. São utilizadas no experimento para manter o reservatório de óleo bem seguro e em posição elevada; prender os niveladores nas posições que mantenham o conjunto capilar – jaqueta nivelados na horizontal e para fixar o termômetro. Para o reservatório que contém o fluido removedor foi elaborado e utilizado um estrutura metálica rígida com quatro pés, que suporta o peso do reservatório. Para auxiliar no controle da temperatura, um termômetro de mercúrio é fixado ao suporte universal e colocado na bancada. É válido lembrar que todos experimentos, análises e caracterização dos fluidos são realizados a 25°C.

Outro componente da bancada experimental é a balança eletrônica, de precisão de centésimo de grama, da empresa Tecnal. A mesma é utilizada para pesar a massa de óleo deslocado. Essa massa de óleo é coletada em um béquer antes da pesagem. Béqueres são recipientes, no caso dos experimentos, fabricados em vidro borossilicato utilizados para coleta dos líquidos de trabalho. São utilizados tanto para coleta do excesso de óleo durante o processo de enchimento do capilar, quanto para coleta da massa de óleo recuperada durante o processo de injeção. Nesse caso, para obter apenas a massa de óleo desejada a massa desse recipiente era descontada.

Para os experimentos de visualização é utilizada uma câmera Nikon modelo D-3100. 7,4/9 V, 2,5 A, com lente macro AF-S DX Micro – Nikkor 40 mm f/2.8 G. A câmera é fixada em um tripé e posicionada a aproximadamente 30 cm da entrada do capilar, para que sejam fotografadas as interfaces entre o óleo e o fluido removedor. Para obtenção das fotografias das interfaces dos fluidos dentro da capilar é necessária uma iluminação adequada. Para isso, todas as lâmpadas do laboratório são apagadas, e é utilizado um refletor de luz. Um refletor é um aparato desenvolvido para refletir o fluxo luminoso das lâmpadas nas direções projetadas, normalmente constituído de chapa de aço branca ou de alumínio, podendo ainda receber acabamentos de tipos diferenciados, como, por exemplo, pinturas. A lâmpada utilizada nesse refletor é uma incandescente de 100 W. Para garantir uma melhor visualização o experimento o refletor é posicionado a frente de um fundo branco. A reflexão da luz proveniente do refletor nesse fundo facilita a obtenção de melhores fotografias.

3.3.2 Descrição dos procedimentos experimentais

Primeiramente são selecionados os tubos capilares, limpos e secos com comprimento de 1,50 m diâmetro interno de 2,4 mm e externo de 4 mm. Eles são avaliados quanto à regularidade do diâmetro interno. Esses tubos são encaixados em uma jaqueta acrílica (C), que além de servir de suporte, é preenchida com glicerina para evitar os efeitos de refração e reflexão, quando a interface da bolha formada entre os fluidos deslocador e deslocado é fotografada. Essa jaqueta e o tubo capilar são nivelados na posição horizontal.

No reservatório A é estocado o fluido a ser deslocado, o fluido 2, que para todos os testes realizados se trata do óleo de soja. No reservatório B é inserido o fluido deslocador, fluido 1, o qual tem composição variada a depender da razão de viscosidades desejada para análise. O preparo de cada um desses fluidos foi descrito previamente.

O escoamento é controlado pelas válvulas de passagem V1, V2, V3 e pelas válvulas de controle de vazão R1 e R2. As válvulas V4 e R3 controlam o fluxo de ar da linha de ar comprimido do laboratório (D) para o reservatório do fluido 1 (B). Uma câmera Nikon D3100 (E) é fixada em um tripé e posicionada a uma distância de 0,3 m da entrada por onde é injetado o fluido deslocador, a fim de obter imagens laterais da interface da bolha formada entre os dois fluidos imiscíveis, quando a mesma viaja por dentro do capilar. As imagens obtidas são avaliadas em um programa de edição de imagem. Nele pode – se observar possíveis diferenças de espessuras da bolha com a posição e são medidos valores dos raios do tubo e da bolha formada. Através de uma relação entre os raios, vide Equação (1.5), é possível obter a razão de massa perdida, m_g .

Todos os testes realizados e medidas das propriedades dos fluidos de trabalho são realizados na temperatura de 25°C, ou seja, 298,15 K.

Para obtenção das imagens é necessário que os pares fluidos imiscíveis utilizados tenham um índice de refração suficientemente diferente um do outro para que seja possível visualizar a interface entre eles. Além dessa característica, os fluidos selecionados devem ter massas específicas com valores próximos, de forma a reduzir os efeitos relacionados ao empuxo e ainda, a tensão interfacial entre eles deve ser baixa para que capilaridades maiores possam ser atingidas.

Conforme já informado o fluido deslocado é o óleo de soja, o qual possuía massa específica, $\rho_2 = 920,00 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade $\mu_2 = 0,05233 \text{ Pa.s}$. Para compor o fluido deslocador são utilizados dois diferentes tipos de fluidos. Primeiro, uma mistura composta por 50% de etanol e 50% de água em volume, a qual tinha massa específica, $\rho_1 = 923,2 \text{ kg/m}^3$ e viscosidade, $\mu_1 = 0,002872 \text{ Pa.s}$, utilizado para validação. E um segundo fluido, uma solução de polietilenoglicol, PEG, com massa molar igual a 6000 g/mol em água deionizada. Após a preparação dessa solução é

adicionado o etanol. Para alcançar os níveis de viscosidades e manter a massa específica próxima a apresentada pelo óleo de soja é alterada as concentrações do polímero, em massa, e após, a partir dessas soluções, é adicionado o etanol em percentual volumétrico. A descrição detalhada do preparo desses fluidos está apresentada na seção 3.1 desse capítulo. A Tabela 3.2, a seguir, apresenta os valores mensurados para a massa específica e a viscosidade dos fluidos utilizados como deslocador, a tensão interfacial entre esses fluidos e o óleo de soja e os adimensionais $N\rho$ e $N\mu$. Os equipamentos e aparatos utilizados bem como os cuidados para obtenção dos valores dessas propriedades foram descritos anteriormente.

Antes de começar a visualização do experimento, o tubo capilar é inserido na jaqueta acrílica (C) e preenchido com o fluido que inicialmente encontra-se estocado no reservatório A. Para isso são abertas as válvulas, V1, V2 e R1. São tomados devidos cuidados para que não fiquem bolhas de ar nem na linha nem no tubo capilar. A mangueira é presa a uma extremidade do tubo capilar com o uso de uma braçadeira para melhor fixação e na outra extremidade é coletado em um béquer (F), o excesso de óleo de soja que escoou a partir do reservatório A. Quando o capilar se encontra completamente preenchido pelo óleo de soja, as válvulas V1, V2 e R1 são fechadas.

Para dar início a visualização são abertas as válvulas V3 e R2 para que o fluido deslocador, o qual inicialmente se encontrava no reservatório B, preencha toda a linha até a completa ausência de bolhas de ar. Então a mangueira é conectada a outra extremidade do tubo capilar também com auxílio de uma braçadeira.

O reservatório (A) é desconectado do tubo capilar retirando a conexão entre as válvulas V2 e R1. Depois de desconectada, a válvula R1 continua fechada, enquanto as V3 e R2 são mantidas completamente abertas. Ao abrir a válvula R1, a interface entre os dois fluidos imiscíveis começa a se deslocar dentro do tubo capilar. A velocidade dessa bolha é controlada pela válvula de controle de fluxo do tipo agulha, R1, através da abertura dessa válvula. Para incrementar a pressão do reservatório A, o mesmo é conectado a linha de ar comprimido (D) e, antes que a válvula R1 seja aberta para dar início ao escoamento, as válvulas V4 e R3 são abertas. Assim, com uma pequena abertura da válvula R1 é possível se observar o escoamento da bolha

por dentro do tubo capilar. Quando a interface da bolha está a 0,3 m da entrada do tubo capilar, a mesma é fotografada pela câmera posicionada na lateral do tubo.

Tabela 3.2. Resumo das propriedades medidas dos líquidos de trabalho aplicados como removedores.

Composição dos fluidos	Massa específica (ρ_1) [kg/m³]	Viscosidade dinâmica (μ_1) [Pa.s]	Tensão interfacial (σ) [mN/m]	Razão de viscosidades ($N\mu$)	Razão de massas específicas ($N\rho$)
água + etanol 50% V/V	923,2	0,002872	8,10	18,22	0,997
(água e PEG 05% p/p) + etanol 70% V/V	948,8	0,004286	7,51	12,21	0,970
(água e PEG 10% p/p) + etanol 70% V/V	937,0	0,005820	5,30	8,99	0,989
(água e PEG 30% p/p) + etanol 90% V/V	937,7	0,013031	2,41	4,02	0,981
(água e PEG 70% p/p) + etanol 100% V/V	946,4	0,028739	2,13	1,82	0,972

Quando a bolha está a 0,1 m da entrada do tubo capilar, a massa do fluido deslocado, fluido 2, começa a ser coletada no béquer (G) e a coleta desse fluido é finalizada quando a bolha percorre 1,05 m de tubo capilar. A massa recuperada é então pesada e a fração de massa perdida, m_e , calculada pela Equação (1.4).

Para calcular a massa total de óleo de soja que estava dentro do capilar nesse, 1,05 m de tubo, é utilizada a expressão abaixo, Equação (3.1):

$$m_t = \rho_2 \cdot V \quad (3.1)$$

Para m_t igual a massa total, ρ_2 igual a massa específica do óleo de soja a 25°C, e V igual ao volume de fluido dentro do capilar, lembrando que o capilar era um tubo cilíndrico de diâmetro interno igual a 2,4 mm e comprimento igual a 1,05m.

Porém, para garantir que a massa que existia dentro do capilar era realmente a encontrada através dos cálculos é realizada uma medida direta da mesma. Para tanto, o tubo capilar é preenchido com o óleo de soja utilizado nos testes na marca de 1,05 m e deixa-se que o óleo escoe completamente em um béquer. Essa massa de óleo é então pesada. Os resultados foram comparados e estiveram em boa concordância. Ao final de cada teste, o nível de fluido dentro do reservatório B é restaurado. A variação dentro do mesmo durante o experimento pode ser negligenciada porque a área transversal do reservatório é suficientemente grande, mantendo o gradiente de pressão praticamente constante durante o experimento.

Uma vez que os líquidos tem viscosidades diferentes, a perda de carga ao longo do capilar se altera com a entrada do fluido deslocador e o escoamento desse pelo tubo. Essa alteração da perda de pressão conduz a uma alteração na velocidade bolha à medida que a mesma viaja através do capilar. Isto é evitado garantindo que a maior parte da perda total de carga ocorra na válvula agulha, R1, de modo que a perda de carga ao longo do capilar possa ser considerada insignificante. Para isso, a válvula R1 tem sua abertura restrita. Assim, qualquer variação que ocorra pode ser considerada desprezível em relação à perda de carga total do sistema, e, portanto, a interface da bolha formada pelos dois fluidos escoam com velocidade constante. Para que isso seja garantido, desprezam-se os 0,35 m finais do tubo capilar, pois uma análise prévia mostrou que mesmo com a válvula restrita na saída e com alta pressão na entrada, a bolha apresentava uma baixa aceleração no comprimento

final do tubo, que possivelmente poderia ser controlada restringindo ainda mais a abertura da válvula R1, mas, isso comprometeria a obtenção de capilaridades maiores, com os pares de fluidos utilizados, visto que a velocidade da bolha seria diminuída.

A velocidade da interface U_b é medida registrando o tempo de passagem da mesma entre duas posições axiais previamente marcadas no tubo capilar. O tempo de passagem total da bolha é obtido também no comprimento de 1,05m. Ou seja, o cronômetro é disparado quando a interface da bolha está a 0,1 m da entrada do tubo capilar e parado quando a mesma atinge a distância de 1,05 m, a partir dessa posição. Para obtenção do número de capilaridade, além dos valores da velocidade da interface e da viscosidade do fluido 2, óleo de soja, é necessário o valor da tensão interfacial entre os pares de fluidos. Essa tensão interfacial foi medida previamente com a utilização de um tensiômetro de anel.

Após cada corrida, todas as válvulas são fechadas, as mangueiras desconectadas do tubo capilar, ele é retirado da jaqueta acrílica e cuidadosamente limpo para que sejam removidos quaisquer contaminantes que possam causar alterações na tensão interfacial. É importante salientar que para os pares de fluidos utilizados foram feitos vários testes para garantir uma limpeza eficaz do tubo capilar. Como uma limpeza mecânica é difícil devido à fragilidade do capilar, a limpeza química com o uso de detergente neutro e após enxágue com água, o uso de álcool isopropílico, se mostrou eficiente para os pares de fluidos utilizados. O capilar utilizado em cada teste é então posto na posição vertical em temperatura ambiente para que o mesmo fique seco. Novos testes com o mesmo tubo só são realizados após 24 horas para garantir que se encontrem completamente secos. Ao final de cada teste, é obtido apenas um ponto do gráfico que relaciona o número de capilaridade com a fração de massa perdida. Com isso, é demasiado o tempo para obtenção de uma curva completa.

É recomendado que os fluidos de trabalho não sejam estocados nos reservatórios por mais de três dias, pois testes preliminares mostraram alterações nas propriedades dos fluidos, justificados, por exemplo, pela evaporação dos solventes. Ou seja, a cada três dias deve ser preparado um novo fluido de trabalho e todas as propriedades novamente medidas para verificar se houve alterações. Os

reservatórios devem ser limpos e novamente preenchidos com o novo fluido preparado. Por isso o preparo dos fluidos utilizados como removedor devem seguir rigorosamente o mesmo procedimento padrão e o óleo de soja utilizado, deve ser da mesma empresa fabricante. Além disso, as medidas das propriedades devem ser feitas da mesma forma e a temperatura de todos experimentos que deve ser mantida constante e igual a 25°C.

3.3.3 Cálculos para obtenção dos resultados

A Figura 3.6 é utilizada para da discussão dos resultados posteriormente apresentados e mostra um esquema do problema analisado. Na região I o escoamento é completamente desenvolvido apenas com o fluido 2 e na região IV o escoamento é completamente desenvolvido com os dois fluidos. Considere que o fluido injetado, fluido 1, vem pistonado em forma perfeitamente cilíndrica de raio R_b .

O tubo é inicialmente ocupado pelo fluido 2 quando o fluido 1 é injetado formando um escoamento bifásico. O fluido 1 forma uma longa bolha que desloca o fluido 2, deixando para trás uma camada residual de óleo preso à parede. Quando a inércia é desprezível a frente da bolha move-se com velocidade constante U_b , a configuração da interface atinge uma forma fixa e a espessura da camada residual de fluido 1 supõe-se constante.

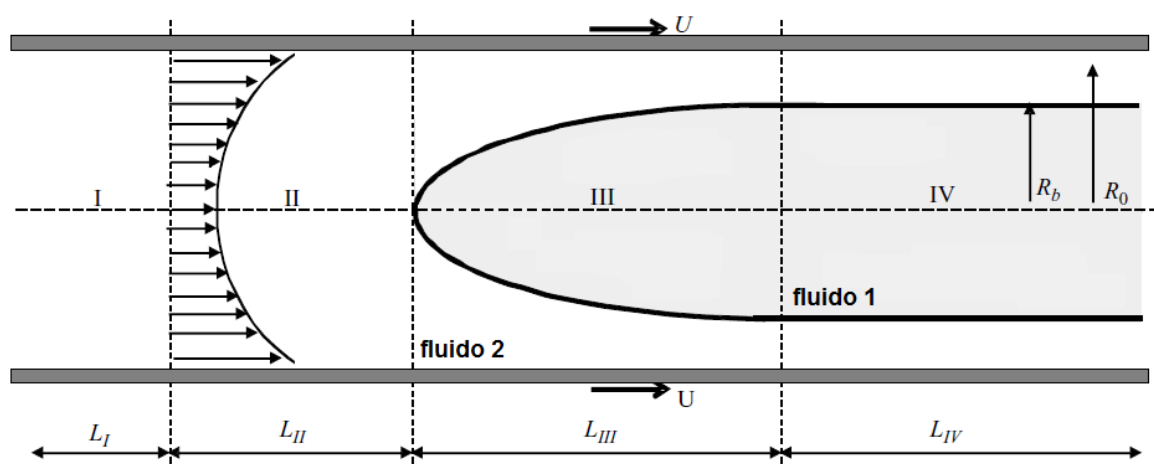


Figura 3.6 - Representação esquemática do problema.

Sejam U_b a velocidade da bolha, \bar{U}_2 a velocidade média do fluido 2 (empurrado) na região I (do lado esquerdo), \bar{U}_2^d a velocidade média do fluido 2 (empurrado) na

região IV (do lado direito cercado pelo fluido 1). As velocidades médias estão associadas ao referencial do tubo.

A fração geométrica de massa perdida pode ser calculada considerando um cilindro de comprimento Δx e raio R_o . Antes do fluido 1 invadir o cilindro, o total de massa de fluido 2 é $\rho\pi R_o^2\Delta x$. Depois que o fluido 1 atravessa o cilindro, a massa de fluido 2 remanescente no cilindro é $\rho\pi (R_o^2 - R_b^2)\Delta x$. Então a fração de massa geométrica m_g é dada pela Equação (3.2):

$$m_g = 1 - \frac{\rho\pi R_b^2\Delta x}{\rho\pi R_o^2\Delta x} = 1 - \frac{R_b^2}{R_o^2} \quad (3.2)$$

Considerando que os dois fluidos tem a mesma massa específica, da equação de conservação da massa tem-se a Equação (3.3):

$$\pi R_o^2 \overline{U}_2 = \pi R_b^2 U_b + \pi (R_o^2 - R_b^2) \overline{U}_2^d \Rightarrow \overline{U}_2 = (1 - m_g) U_b + m_g \overline{U}_2^d \quad (3.3)$$

Onde \overline{U}_2^d é a velocidade média do fluido 2 que é arrastado pelo fluido 1 dentro do tubo. Portanto m_g pode ser expresso como uma função das velocidades, sendo, Equação (3.4):

$$m_g = \frac{U_b - \overline{U}_2}{U_b - \overline{U}_2^d} \quad (3.4)$$

Para calcular a fração de massa depositada na parede do tubo, como uma função da relação entre massas total e recuperada e como uma função das velocidades, inicialmente foi percebido que o intervalo de tempo a partir do momento que o fluido deslocador está prestes a entrar no cilindro considerado para essas análises até o momento em que o fluido 1 está prestes a sair é dado pela Equação (3.5):

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{U_b} \quad (3.5)$$

Durante esse tempo a quantidade de fluido recuperada é dada pela Equação (3.6):

$$\dot{m}_2 \Delta t = \rho\pi R_o^2 \overline{U}_2 \frac{\Delta x}{U_b} \quad (3.6)$$

Onde \dot{m}_2 é a fração mássica de fluido 2 que deixa o tubo. A fração de massa não recuperada é então dada pela Equação (3.7):

$$m_e = 1 - \frac{\rho\pi R_o^2 \bar{U}_2 \frac{\Delta x}{U_b}}{\rho\pi R_o^2 \Delta x} = 1 - \frac{\bar{U}_2}{U_b} = \frac{U_b - \bar{U}_2}{U_b} \quad (3.7)$$

Comparando as equações 3.4 a 3.7 foi notado que quando o fluido 1 é um fluido com baixa viscosidade, como um gás por exemplo, o mesmo não é capaz de arrastar o fluido 2 dentro do tubo ($\bar{U}_2^d = 0$) e por causa disso, $m_e = m_g$.

Os resultados experimentais são obtidos através de uma medida direta da massa de óleo (fluido 2) que é recuperada e considerando que a massa inicial desse fluido que está contida no tubo capilar é $\rho\pi R_o^2 \Delta x$. Sendo $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$, $R_o = 1,2 \text{ mm}$ e $\Delta x = 1,5 \text{ m}$. Com esses dados e utilizando a relação apresentada na Equação (1.4) é obtida a fração de massa depositada de óleo na parede do tubo. Como o tempo de passagem da bolha pela distância considerada, 1,5 m, é cronometrado, é possível obter a velocidade da bolha e calcular essa mesma fração de massa m_e pela relação entre as velocidades da bolha e do escoamento (Equação 3.7).

A outra forma de análise é através da imagem da bolha formada. O diâmetro interno do tubo é medido assim como o diâmetro da bolha em um programa de edição de imagens e, através de relação matemática simples os mesmos são correlacionados aos valores reais. Aplica-se a Equação (1.5 ou a 3.2) e então se obtêm os valores para as frações geométricas de massa perdida.

Para o cálculo dos números de capilaridade é utilizada a definição desse adimensional (Equação 1.2).

Ao final do procedimento experimental os dados experimentais obtidos são a fração de massa remanescente m_e e a fração geométrica de massa residual m_g avaliados em diferentes valores de números de capilaridade Ca definidos pela Equação (1.2), porém, sendo σ a tensão interfacial entre os dois líquidos e ainda, em variadas razões de viscosidade $N\mu$ definida pela Equação (1.3). Essas frações de massas são definidas respectivamente pela Equação (3.7) e (3.2).

Frisa-se que a espessura de filme líquido depositado na parede do capilar pode ser medida de três formas: pela espessura do filme líquido medida diretamente das imagens do experimento de visualização, tal como é obtido m_g . Pela coleta do

líquido deslocado em um bécker e medição da massa em uma balança de precisão, ou por uma relação entre as velocidades da bolha e média do fluido deslocado.

Para obter a velocidade da bolha U_b é aplicada uma relação direta entre a distância percorrida pela bolha entre duas listras preferenciais Δx e o intervalo de tempo para percorrê-las Δt . A velocidade média da fase deslocada \bar{U}_2 é obtida da definição de vazão mássica conforme Equação (3.8):

$$\bar{U}_2 = \frac{M/\Delta t}{\rho_2 \pi R_0^2} \quad (3.8)$$

Em que M é a massa coletada durante o intervalo de tempo Δt , ρ_2 é a massa específica do líquido deslocado e R_0 o raio interno do tubo capilar.

No próximo capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos segundo a metodologia discutida nessa seção.

CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O objetivo fundamental deste trabalho é estudar como a fração de massa de óleo depositada na parede de um tubo capilar varia em função da razão de viscosidades e do número de capilaridade. É analisado ainda, como varia a forma da interface da bolha “considerando esses parâmetros” e se há alteração na espessura de massa depositada ao longo do escoamento ou ainda quebras nas bolhas, durante a injeção de um líquido que atua como removedor. A espessura do filme de óleo que reveste a parede interna de um tubo capilar após a passagem de um líquido é resultante do equilíbrio dinâmico desse escoamento de deslocamento, ou seja, do balanço de forças na superfície livre.

Nesta abordagem experimental foi avaliada a massa depositada na parede do tubo capilar através da pesagem de massa de óleo deslocado e através de outra forma de medição a qual considera a visualização da bolha. A fração de massa depositada ou de massa perdida através do método da pesagem foi denotada m_e . A fração de massa perdida calculada considerando o raio da bolha e o raio interno do tubo capilar que foram obtidos através da imagem da interface foi chamada de fração geométrica de massa perdida ou m_g . Na literatura, ambas são chamadas apenas de fração de massa perdida ou fração de massa depositada na parede do tubo m . Essa nomenclatura foi dada para um melhor entendimento. Ambos dados foram dispostos em função do número de capilaridade e da razão de viscosidades e utilizados para gerar os gráficos deste capítulo.

4.1 Validação da bancada experimental

Conforme comentado na introdução desse capítulo, a quantidade de líquido 2, remanescente na parede do tubo capilar é comumente reportado em termos da fração de massa de líquido que não foi deslocado m ou pela espessura do filme

líquido deixado na parede. A Figura 4.1 ilustra a interface com as devidas indicações, onde D_b é o diâmetro da bolha e D_o é o diâmetro interno do tubo capilar.

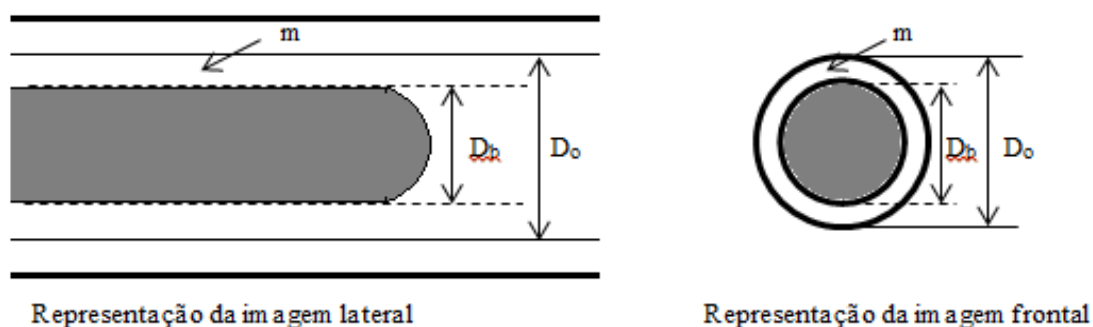


Figura 4.1 - Representação esquemática da visão lateral e frontal da bolha dentro do tubo capilar.

A fração de massa do líquido 2 remanescente na parede do tubo capilar pode ser avaliada aplicando o princípio de conservação da massa para o líquido 2 em um volume de controle que contém a interface entre os dois fluidos empregados. É importante salientar que somente no caso particular, onde os fluidos deslocadores apresentam viscosidades baixas ($\mu_2/\mu_1 \rightarrow \infty$), como por exemplo, um gás, a fração de massa m_g pode ser avaliada pela expressão proposta por Taylor (1961), representada nesse trabalho pela Equação (1.1).

Os resultados experimentais foram obtidos para baixos números de Reynolds, e assumiu-se que os efeitos de inércia poderiam ser negligenciados. Os testes foram conduzidos de forma que a bolha não sofresse aceleração (U_b constante), o que mantinha a geometria da interface entre os dois fluidos fixa.

O principal objetivo desse trabalho é estudar o efeito dos números de capilaridade, Ca , calculados pela Equação (1.2) onde σ é a tensão interfacial entre os dois líquidos e o efeito das razões de viscosidades $N\mu$ calculadas de acordo com a Equação (1.3) e relacioná-los a massa perdida que fica depositada na parede do tubo após a passagem de um fluido removedor. Essa massa é calculada experimentalmente, utilizando os raios do capilar e da bolha formada (Equação 1.5) e também pela relação entre as massas pesadas e a massa total que inicialmente se encontrava dentro do tubo ou ainda, por uma relação entre as velocidades da bolha e média do fluido deslocado de acordo com a Equação (1.4).

Para validar o procedimento experimental, foram empregados os resultados experimentais para um deslocamento gás-líquido obtidos por Taylor (1961). A Figura 4.2 compara os dados experimentais alcançados por Taylor (1961) juntamente com resultados experimentais desse trabalho. A razão de viscosidades adotada nos experimentos para que a validação fosse feita era de 18,22, obtida entre os pares de fluidos: óleo de soja (fluido 2) e água mais etanol com percentual de 50% em volume (fluido 1). Comparando os resultados experimentais do presente trabalho aos apresentados por Taylor (1961), pode – se afirmar que estão em boa concordância em ambas às formas calculadas para fração de massa depositada na parede do tubo capilar (m_g e m_e) na faixa de capilaridade estudada.

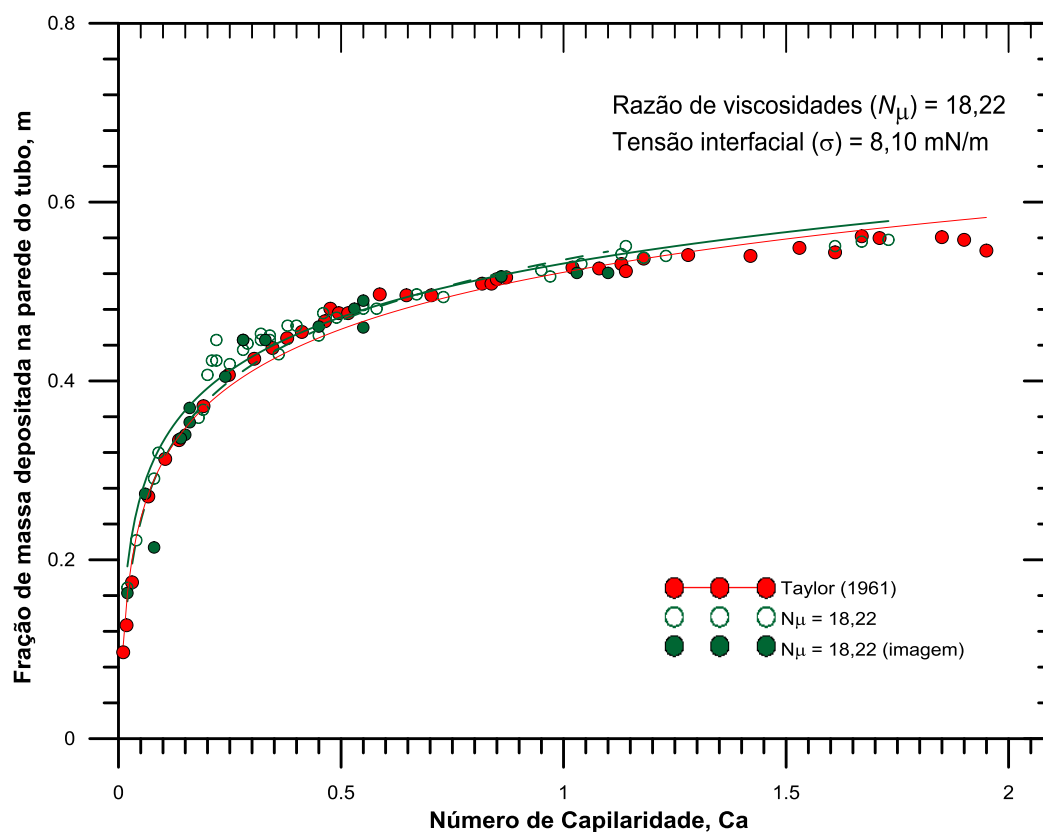


Figura 4.2- Validação da bancada experimental.

É válido lembrar que a razão de viscosidades entre os dois líquidos, $N_\mu = 18,22$, é suficientemente grande para reproduzir o caso limite de deslocamento gás-líquido. Durante o trabalho, procurou-se explorar diversos valores para o número capilaridade em diferentes razões de viscosidades em busca de um valor assintótico para a fração de massa depositada. Valores assintóticos foram observados

experimentalmente por Cox (1962) e Taylor (1961), entre outros, para uma razão de viscosidade considerada infinita.

4.2 Análise da fração geométrica de massa residual m_g e da fração de massa perdida m_e em função do número de capilaridade e da razão de viscosidades

Os gráficos a seguir apresentam uma relação entre o número de capilaridade e a fração de massa depositada obtida de ambas as formas, descritas na introdução desse capítulo, para cada razão de viscosidades $N\mu$ estudada. É válido lembrar que as razões de viscosidades $N\mu$ estudadas foram: 18,22; 12,21; 8,99; 4,02; 1,82. Os dados foram comparados aos obtidos por Taylor (1961) onde um gás recuperava líquido. Para o trabalho apresentado, todos os testes foram feitos com o fluido menos viscoso recuperando o mais viscoso. A Figura 4.3 apresenta os resultados da fração de massa depositada ou de massa perdida na parede do tubo através do método da pesagem, m_e , em relação ao número de capilaridade Ca , para as razões de viscosidades estudadas.

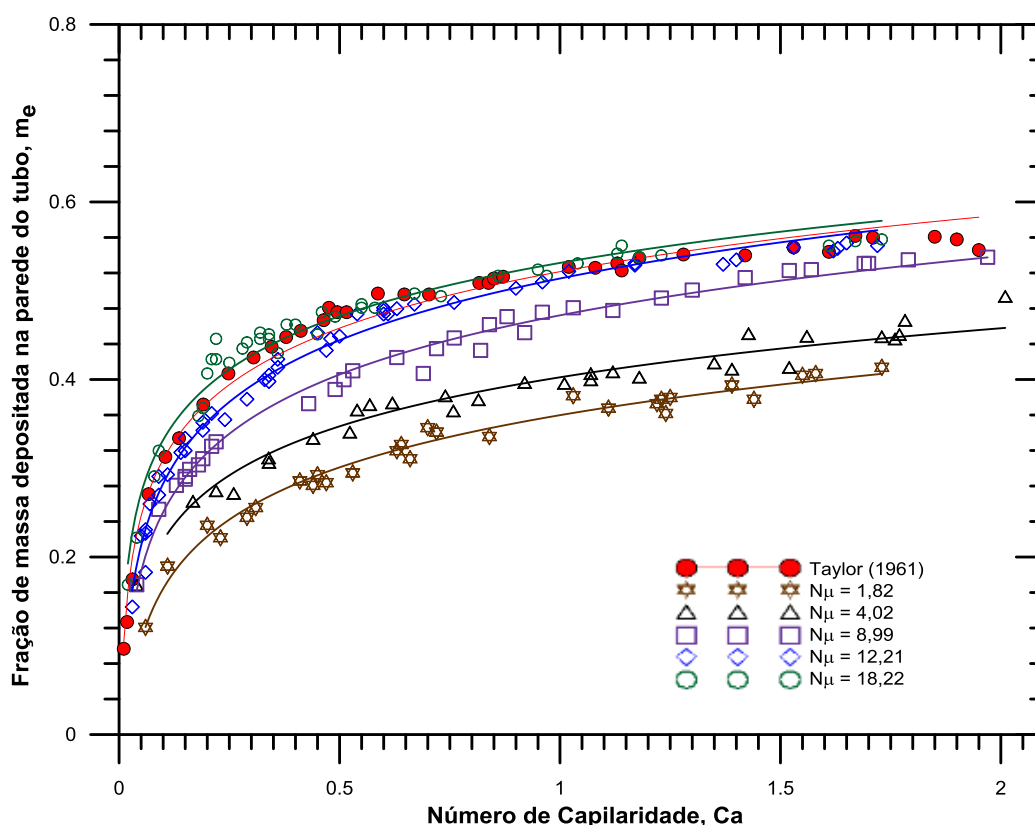


Figura 4.3 – Número de capilaridade versus fração de massa perdida (m_e).

Os círculos verdes sem preenchimento correspondem à fração de massa perdida m_e para razão de viscosidades $N\mu$ igual a 18,22. Os losangos azuis sem preenchimento representam a fração de massa perdida m_e para razão de viscosidades igual a 12,21. Essa mesma fração para $N\mu$ igual a 8,99 está simbolizada pelos quadrados roxos sem preenchimento. Quando $N\mu$ igual a 4,02, m_e está representado pelos triângulos pretos sem preenchimento e as estrelas marrons sem preenchimento são os resultados experimentais obtidos para fração de massa perdida m_e quando a razão de viscosidades é igual a 1,82.

Os testes experimentais foram realizados para uma faixa de números de capilaridade Ca em razões fixas de viscosidade $N\mu= 18,22; 12,22; 8,99; 4,02; 1,82$. Os resultados mostram claramente que a eficiência da recuperação aumenta quando $N\mu$ é reduzido. Para todos os valores de $N\mu$ quando a importância das forças interfaciais cai, para altos valores de Ca , m_e tende a um valor assintótico.

É importante salientar que os resultados observados por Taylor (1961) (círculos vermelhos) são similares aos valores apresentados para m_e quando $N\mu=18,22$ (círculos verdes sem preenchimento). Em outras palavras a eficiência do deslocamento líquido-líquido, nessa razão de viscosidades, é equivalente ao deslocamento gás-líquido. Para $N\mu= 12,22$ os valores de m_e também estão bem próximos aos valores apresentados por Taylor (1961). Essa fração de massa depositada só apresenta certa diferença do caso gás-líquido quando $N\mu = 8,99$ (quadrados roxos sem preenchimento) e só é significativa quando $N\mu=4,02$ (triângulos pretos sem preenchimento), onde m_e assintotiza em aproximadamente 0,45, valor 20% menor que o valor assintótico apresentado por Taylor (1961), 0,56. A menor razão de viscosidades testada foi 1,82 (estrelas marrons sem preenchimento). Nessa razão foram apresentados os menores valores de fração de massa perdida m_e para um mesmo número de capilaridade, se os dados forem comparados às demais $N\mu$.

A Figura 4.4 ilustra a fração geométrica de massa perdida m_g para a mesma faixa de números de capilaridades dispostos na figura anterior. A fração geométrica foi calculada utilizando a Equação (1.5), onde os raios R_b e R_o foram extraídos das fotografias tiradas dos testes.

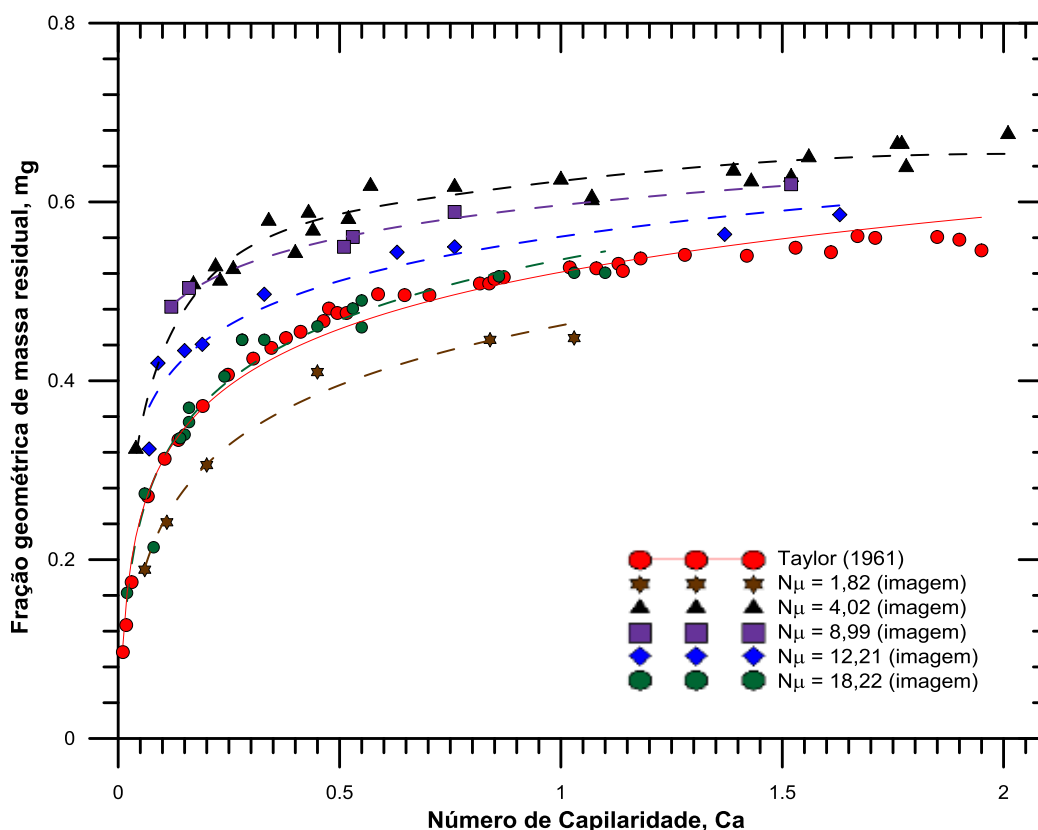


Figura 4.4 – Número de capilaridade *versus* fração geométrica de massa residual (m_g).

Os símbolos de círculo verde escuro preenchido, losango azul escuro preenchido, quadrado roxo preenchido, triângulo preto preenchido e estrela marrom escura representam os resultados experimentais do presente trabalho para a fração geométrica de massa residual *versus* o número de capilaridade, respectivamente para razão de viscosidades 18,22, 12,21, 8,99, 4,02 e 1,82.

Como esperado, o caso gás líquido foi obtido quando $N_{\mu}=18,22$ (círculos verdes cheios). Esses resultados foram satisfatórios, já que nesse caso, $m_g = m_e$. Com o crescimento na razão de viscosidades notou-se um decréscimo de m_g . Essa tendência foi prevista por Soares et al. (2005) e Soares & Thompson (2009). Há de ser salientado, porém, que quando a razão de viscosidades era igual a 1,82, esperava-se que a fração geométrica m_g obtivesse os maiores valores e no entanto apresentaram os menores valores, inclusive até abaixo da curva de Taylor (1961).

Comparando o atual estudo com os elaborados por Goldsmith & Mason (1963), verificou-se que os autores encontraram para m_g o valor de 0,59 quando $N_{\mu}= 4,55$ e

$Ca=1,43$. Valor bem próximo ao encontrado experimentalmente pelas imagens obtidas nesse trabalho, onde nesse mesmo número de capilaridade, m_g era igual a 0,62. Essa diferença percentual de aproximadamente 5 % na fração geométrica de massa perdida é aceitável já que a razão de viscosidades desses autores é em torno de 12% maior que a estudada na pesquisa atual.

Os resultados obtidos para fração geométrica de massa perdida m_g foram comparados com os obtidos por Soares et al. (2005). Nota-se no gráfico, representado pela Figura 4.5 um comportamento qualitativamente similar a dos resultados experimentais e as previsões numéricas desses autores, que observaram que quanto menor a razão de viscosidades, maior é a espessura do filme depositado na parede do tubo para um mesmo número de capilaridade. Quantitativamente, os valores obtidos experimentalmente na presente pesquisa para m_g em uma mesma razão de viscosidades e número de capilaridade apresentam valores superiores aos encontrados pelos autores.

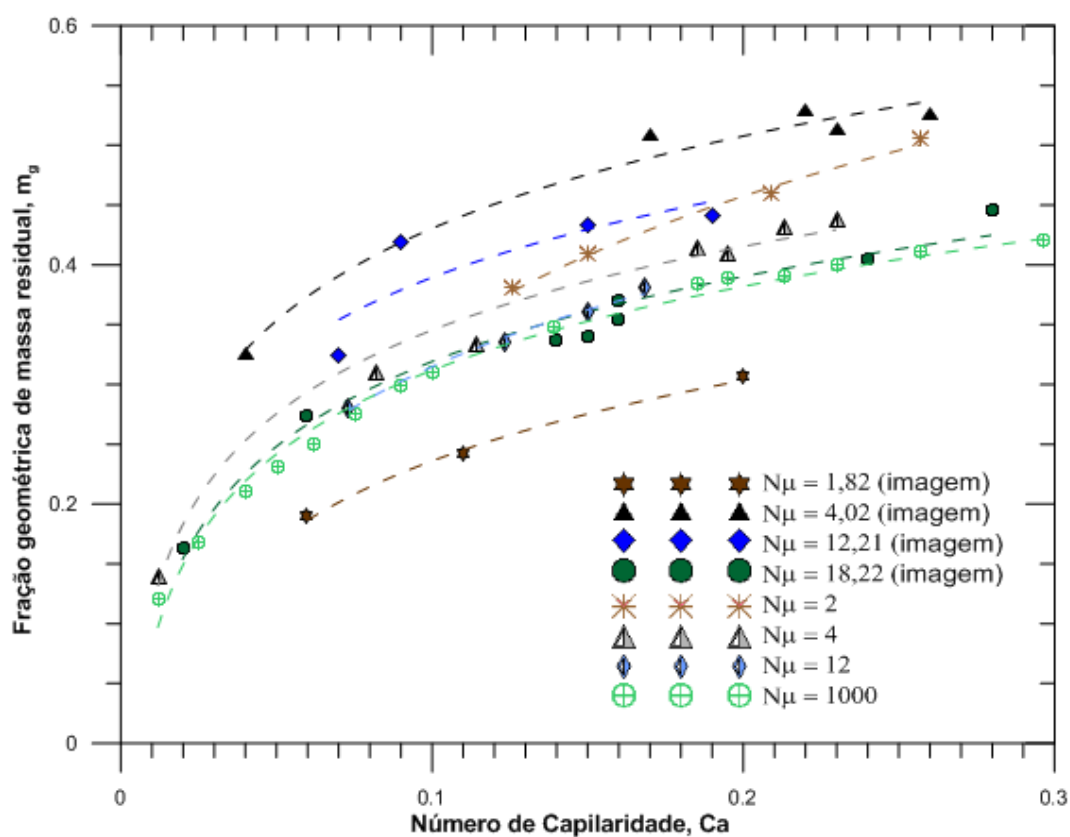


Figura 4.5 - Comparação entre os resultados experimentais com os obtidos por Soares et al. (2005). Análise pela imagem.

Os símbolos de círculos verdes claros com cruz, losango azul claro semipreenchido, triângulos cinza semipreenchidos e asteriscos marrons claros representam os resultados experimentais para a fração geométrica de massa residual *versus* o número de capilaridade, respectivamente para razão de viscosidades 1000, 12, 4 e 2 dos autores mencionados. A razão 1000 representa o caso gás-líquido, tal como a razão 18,22 da atual pesquisa.

Os cálculos segundo este método que considera o raio da bolha e o raio do tubo a partir de uma fotografia apresentam incertezas, associadas basicamente a dificuldade de identificar de forma padronizada em todas as imagens às interfaces procuradas (líquido-líquido e líquido-parede interna do tubo). Portanto, como as análises quantitativas são feitas a partir das visualizações, apresentadas posteriormente, as diferenças entre os resultados obtidos nesse trabalho e entre os trabalhos anteriores podem estar associadas a esse fator e ainda, a espessura do filme líquido, medida com base nos raios da bolha e do capilar pressupõe que a bolha esteja perfeitamente simétrica no interior do tubo, o que nem sempre ocorre. Esse fato acrescenta muitas incertezas nas medições para uma faixa de Ca relativamente longa, o que também pode justificar essa diferença entre as medições para m_g . Entretanto, as fotografias como indicadores qualitativos representam claramente a diferença no formato da frente da bolha para líquidos de diferentes comportamentos mecânicos.

Os resultados obtidos para a fração de massa do líquido 2 remanescente na parede do tubo, obtidas de ambas formas mencionadas anteriormente, m_g e m_e , em função do número de capilaridade e da razão de viscosidades, então resumidos na Figura 4.6, a seguir. Nesse gráfico observa-se o comportamento distinto apresentado para m_g e m_e . Fixando o número de capilaridade, ao diminuir a razão de viscosidades, m_e diminui enquanto m_g cresce. Exceto para $N\mu$ igual a 1,82, onde o esperado era que com essa razão de viscosidades, a curva referente à fração de massa geométrica de massa residual, m_g , por capilaridade estivesse acima da curva de razão 4,02. O que não foi verificado.

Um fato observado durante os experimentos foi a presença de instabilidades nas bolhas formadas e, a depender do número de capilaridade, foi notada a presença de quebras da bolha, não obtendo mais o comportamento de uma longa bolha semi-

infinita do começo ao fim do escoamento pelo tubo capilar. Esse comportamento também foi observado experimentalmente por Olbricht & Kung (1993) que sugeriram existência de um número de capilaridade crítico acima do qual a bolha finita era instável. Esse indício pode estar relacionado à discrepância entre os valores obtidos para a fração de massa depositada na parede do capilar m_g através da imagem, onde se considerou apenas o diâmetro da bolha próximo à interface e a fração massa m_e obtida após cálculos que incluem a pesagem da massa recuperada.

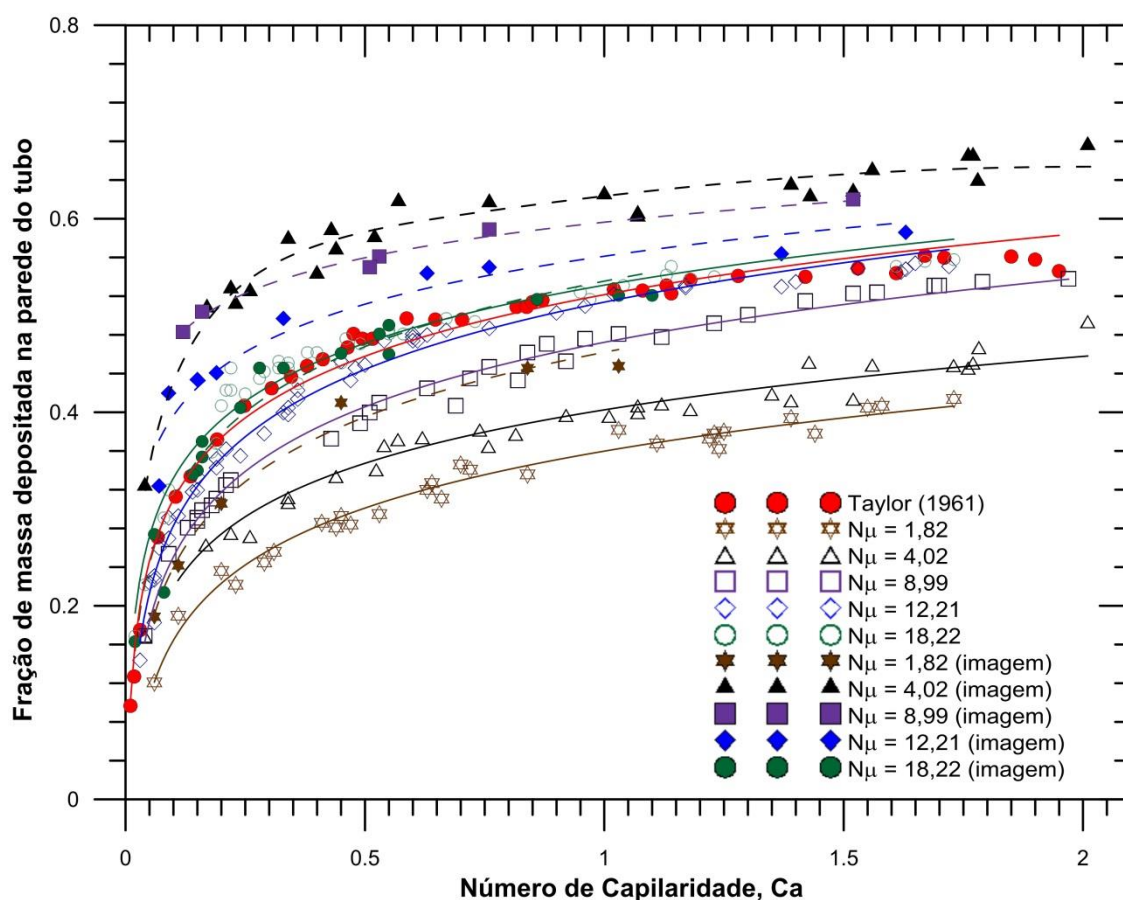


Figura 4.6 - Fração de massa depositada no tubo em função do número de capilaridade e da razão de viscosidades.

Para cada razão de viscosidades estudadas foram fotografadas as interfaces das bolhas formadas a fim de investigar a forma das mesmas e a variação em relação a esse parâmetro e em relação ao número de capilaridade.

As imagens que serão apresentadas a seguir não reproduzem todas as fotos tiradas nos experimentos, sendo apenas uma seleção já que a sequência completa possui uma quantidade muito maior de quadros. A dificuldade estava em manter um padrão

de qualidade de imagens e obter os mesmos números de capilaridade para fluidos distintos (com as variadas razões de viscosidades estudadas), já que ambos são controlados manualmente. O primeiro é controlado manualmente pela abertura do obturador da câmera, sendo a luz e a vibração da câmera as causas de interferências e no segundo, a dificuldade estava em manter uma abertura no conjunto de válvulas na qual fosse possível obter o mesmo número de capilaridade em razões de viscosidades diferentes.

Os efeitos relacionados ao empuxo não puderam ser completamente evitados nesse experimento, visto que não foi possível obter líquidos com exatamente a mesma massa específica do óleo de soja. Observa-se assim, que a interface não se encontra completamente simétrica em relação ao tubo capilar. As imagens demonstram que a espessura do filme de líquido deixado na parede no tubo, aumenta com o aumento do número de capilaridade e ainda que, com a diminuição da razão de viscosidades a fração de massa perdida aumenta para um mesmo número de capilaridade, exceto para razão 1,82. Qualitativamente, os resultados tem comportamento similar aos apresentados por Soares et al. (2005).

Os autores referenciados exploraram experimentalmente baixos valores de capilaridade, devido a limitações encontradas no experimento. Os testes aqui demonstrados expandem os valores do número de capilaridade, contemplando algumas capilaridades exploradas pelos autores. Para uma análise de comparação conclusiva seriam necessários mais testes realizados com baixos valores de número de capilaridade.

Para verificar se havia alteração na espessura do filme de óleo remanescente na parede interna do tubo capilar foram obtidas imagens laterais da bolha ao longo do escoamento para determinadas razões de viscosidades. Essas fotografias foram tiradas em três pontos. Quando a ponta da bolha de líquido deslocador estava a 30 cm da entrada do capilar, quando a mesma se encontrava a 60 cm e a 95 cm da entrada do tubo. É válido lembrar que a câmera era mantida em posição fixa.

Seguem as imagens sequenciais para alguns números de capilaridade, dentro de uma mesma razão de viscosidades. As baterias de imagens apresentadas foram obtidas com uma lente macro, a qual possibilitava visualizar possíveis alterações na

bolha ao longo do escoamento. As Figuras 4.07 a 4.11 representam a interface e a forma da bolha ao longo do escoamento pelo tubo capilar para um fluido com razão 18,22, fluido de validação. É notável que com aumento da capilaridade a bolha se torna mais fina como já verificado por outros autores anteriormente. Nesse caso, não há alteração no diâmetro da bolha ou na espessura do filme líquido depositado na parede. Comportamento similar é visto quando avaliadas as imagens considerando o número de capilaridade para a razão de viscosidades entre o óleo de soja e o fluido removedor igual a 4,02. Porém nesse caso, já são visíveis algumas alterações no diâmetro da bolha ao longo do escoamento. As Figuras 4.12 e 4.13 ilustram imagens da bolha quando $N\mu = 4,02$. Observa-se uma leve alteração no diâmetro da bolha na Figura 4.13.

Performance peculiar porém, apresentaram as bolhas na razão de viscosidades igual a 1,82. Nessa razão de viscosidades, com a análise pela imagem esperava-se que a fração de massa perdida na parede, nesse trabalho nomeado de fração geométrica de massa residual m_g , fosse maior que a fração de massa perdida quando $N\mu = 4,02$, dado um mesmo número de capilaridade. Essas imagens sugerem que esse comportamento distinto pode está associado a presença de instabilidades ao longo do escoamento, ou seja, a premissa de que haveria um filme de espessura constante ao longo do tubo não é válida para esse caso. As Figuras 4.14 a 4.19 ilustram uma sequência de fotos para números capilares distintos, onde é possível observar a presença de ondulações ao longo do escoamento para todos os números estudados na razão de viscosidades igual a 1,82.

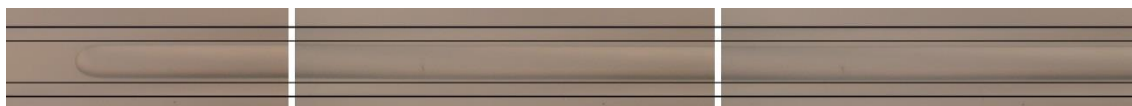


Figura 4.7 – Imagem da bolha. $N\mu = 18,22$, $Ca = 0,02$, $m_g = 0,163$.



Figura 4.8 – Imagem da bolha. $N\mu = 18,22$, $Ca = 0,16$, $m_g = 0,354$.



Figura 4.9 – Imagem da bolha. $N\mu= 18,22$, $Ca= 0,45$, $m_g = 0,461$.



Figura 4.10 – Imagem da bolha. $N\mu= 18,22$, $Ca= 0,55$, $m_g = 0,49$.

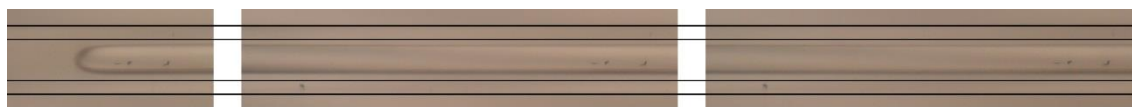


Figura 4.11 – Imagem da bolha. $N\mu= 18,22$, $Ca= 0,86$, $m_g = 0,517$.



Figura 4.12 – Imagem da bolha. $N\mu= 4,02$, $Ca= 0,40$, $m_g = 0,543$.



Figura 4.13 – Imagem da bolha. $N\mu= 4,02$, $Ca= 0,44$, $m_g = 0,568$.

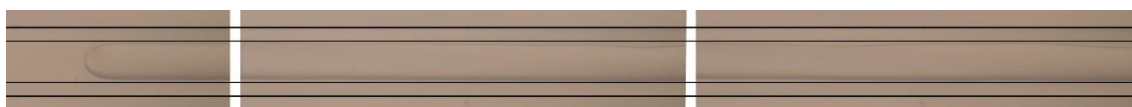


Figura 4.14 – Imagem da bolha. $N\mu= 1,82$, $Ca= 0,06$, $m_g = 0,189$.



Figura 4.15 – Imagem da bolha. $N\mu= 1,82$, $Ca= 0,11$, $m_g = 0,242$.



Figura 4.16 – Imagem da bolha. $N\mu= 1,82$, $Ca= 0,20$, $m_g = 0,306$.



Figura 4.17 – Imagem da bolha. $N_{\mu}= 1,82$, $Ca= 0,45$, $m_g = 0,410$.



Figura 4.18 – Imagem da bolha. $N_{\mu}= 1,82$, $Ca= 0,84$, $m_g = 0,446$.



Figura 4.19 – Imagem da bolha. $N_{\mu}= 1,82$, $Ca= 1,03$, $m_g = 0,478$.

Comparando a Figura 4.9 a 4.17 onde o número de capilaridade em ambas é igual a 0,45, o esperado era que na imagem relativa a razão de viscosidades igual a 1,82 a bolha estivesse mais fina, no entanto a mesma é mais chata que a bolha para o mesmo número de capilaridade e razão igual a 18,22. Além disso, a espessura do filme de óleo não é constante ao longo do tubo capilar e a imagem apresenta sinuosidades, o que pode ser uma explicação plausível para o comportamento diferenciado.

Na Figura 4.18 pode ser observada uma quebra na bolha, não mantendo a condição inicial de uma longa bolha de diâmetro constante até o final do tubo. Essas considerações sugerem uma justificativa para o resultado apresentado. Salienta-se porém a necessidade de se aprofundar nas causas das quebras das bolhas para tecer considerações fundamentadas a respeito da relação das mesmas com os resultados apresentados, o que não foi objeto de estudo da presente pesquisa.

CAPÍTULO 5 COMENTÁRIOS FINAIS

Esse trabalho tratou experimentalmente sobre o deslocamento de líquidos newtonianos imiscíveis em tubos capilares. Foi calculada fração de massa de óleo não recuperada durante o processo de injeção de um líquido removedor para variados números de capilaridade e a razão de viscosidades. Estudou-se o efeito da razão de viscosidades e do número de capilaridade sobre a fração de massa perdida na parede do tubo capilar.

Os resultados mostraram um comportamento qualitativamente satisfatório se comparados a trabalhos anteriores, quando os cálculos para obtenção dessa fração de massa perdida m_g ou fração geométrica de massa perdida foi obtida pelo mesmo método utilizado por outros autores no qual é considerando os raios da bolha formada e do tubo capilar. Ou seja, aumentando o número de capilaridade para uma dada razão de viscosidades, a fração de massa perdida aumentou e, mantendo o número de capilaridade e diminuindo a razão de viscosidades essa fração de massa perdida também foi aumentada, exceto para o caso onde a razão de viscosidades era igual a 1,82.

Porém, ao calcular essa fração de massa de óleo remanescente na parede do tubo por uma relação entre massas recuperada e total ou entre velocidade da bolha e velocidade média do fluido deslocado m_e apesar de para uma mesma razão de viscosidades, aumentando a capilaridade essa fração foi aumentada, quando a razão de viscosidades foi diminuída, essa fração de massa perdida também diminuiu, em uma mesma capilaridade.

Como foram notadas instabilidades na bolha, sugere-se que esse comportamento distinto esteja associado a não uniformidade do filme formado quando o fluido removedor percorre o tubo capilar, que estaria diretamente ligado a essas perturbações. E ainda foram notadas quebras de bolhas, não mantendo em todos os casos analisados uma bolha semi-infinita o que poderia está promovendo o arraste

do óleo que inicialmente se encontrava no tubo capilar. Recomenda-se explorar as causas e condições de ocorrência das quebras das bolhas em trabalhos futuros para averiguar a respeito dessa consideração.

É válido lembrar que para o caso onde a razão de viscosidades tinha o valor igual a 18,22, que reproduzia o caso de deslocamento gás-líquido, porém com a utilização de dois líquidos newtonianos, os resultados obtidos de ambas as formas estiveram de acordo com publicações anteriores, validando a bancada experimental.

Os efeitos associados ao empuxo não foram completamente eliminados devido à dificuldade na obtenção de líquidos imiscíveis com mesma massa específica e que atendesse aos demais requisitos como: baixa tensão interfacial; razão de viscosidades com valores próximos aos encontrados em trabalhos anteriores para devidas comparações e ainda índices de refração distintos, para que fossem obtidas imagens da interface.

Essa pesquisa serve de base para futuras comparações com a utilização de líquidos não newtonianos.

REFERÊNCIAS

- ALLOUCHE, M., FRIGAARD, I. & SONA, G., 2000. Static Wall Layers in the Displacement of Two Visco-Plastic Fluids in a Plane Channel. *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 424, pp. 243-277.
- BAKHTIYAROV, S. & SIGINER, D., 1996. Fluid Displacement in a Horizontal Tube. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Volume 65, pp. 1-15.
- BRETHERTON, F., 1961. The Motion of Long Bubbles in Tubes. *Journal of Fluids Mechanics*, Volume 10, pp. 166-188.
- CACHILE, M.; CHERTCOFF, R.; CALVO, A.; ROSEN, M.; HULIN, J. P.; CAZABA, A. M., 1996. Residual film dynamics in glass capillaries. *Journal of Colloid and Interfacial Science*, Volume 182, pp. 483-491.
- CARNEY, L.L., 1974. Cement Spacer Fluid. *Society of Petroleum Engineers*, Volume 4784.
- CELNIK, J. *Deslocamento de Líquidos em Espaços Anulares* [dissertação de mestrado]. Rio de Janeiro: Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio; 2008.
- COX, B., 1962. On Driving a Viscous Fluid Out of a Tube. *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 14, pp. 81-96.
- COX, B., 1964. An experimental investigation of the streamlines in viscous fluid expelled from a tube. *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 20, pp. 193-200.
- de SOUZA MENDES, P., DUTRA, E., SIFFERT, J. & NACCACHE, M., 2007. Gas Displacement of Viscoplastic Liquids in Capillary Tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Volume 145, pp. 30-40.

DIMAKOPOULOS, Y. & TSAMOPOULOS, J., 2003. Transient displacement of a viscoplastic material by air in straight and constricted tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics*, Volume 112, pp. 43-75.

DIMAKOPOULOS, Y. & TSAMOPOULOS, J., 2007. Transient displacement of Newtonian and viscoplastic liquids by air in complex tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics*, Volume 142, pp. 162-182.

DUTRA, E.; MARTINS, A.L.; MIRANDA, C.R.; ARAGÃO, A.F.L.; CAMPOS, G.; MENDES, P.R.S.; NACCACHE, M.F., 2005. Dynamics of Fluid Substitution While Drilling and Completing Long Horizontal-Section Wells. *Society of Petroleum Engineering*, Volume 94623.

FAIRBROTHER, F. & STUBBS, A., 1935. Studies in Electro-Endosmosis - Part IV - The bubble-tube method of measurements. *Journal of Chemical Society*, Volume 1, pp. 527-529.

FENG, J., 2009. A long gas bubble moving in a tube with flowing liquid. *Journal Multiphase Flow*, Volume 35, pp. 738-746.

GOLDSMITH, H. & MASON, S., 1963. The Flow of Suspension Through Tubes ii. Single Large Bubbles. *Journal of Colloid Science*, Volume 18, pp. 237-261.

HAUT, R., 1978. Applications of a Computer Simulator to Primary Cementing. *Society of Petroleum Engineers*, Volume 7588.

HAUT, R. & CROOK, R., 1981. Laboratory Investigation of Lightweight, Low-Viscosity Cementing Spacer Fluids. *Society of Petroleum Engineers*, Volume 10305, pp. 1828-1834.

HODGES, S. R.; JENSEN, O. E. & RALLISON, J. M., 2004. The motion of a viscous drop through a cylindrical tube. *Journal Fluid Mechanics*, Volume 501, p. 279-301.

HUZYAK, M. & KOELLING, I., 1997. The penetration of a long bubble through a viscoelastic fluid in a tube. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Volume 71, pp. 73-88.

LEE, G., SHAQFEH, E. & KHOMAMI, B., 2002. A study of viscoelastic free surface by finite element method Hele-Shaw and slot coating flows. *Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics*, Volume 117, pp. 117-139.

OLBRICHT, W. & KUNG, D., 1993. The Deformation and Breakup of Liquid Drops in Low Reynolds Number Flow Through a Capillary. *Physics of Fluids*, Volume 4, pp. 1347-1354.

PETITJEANS, P. & MAXWORTHY, T., 1996. Miscible Displacements in Capillary Tubes - Part 1: Experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, Volume 326, pp. 37-56.

SAUER, C., 1987. Mud displacement during cementing: A state of the art. *Journal of Petroleum Technology*, Volume 14197, pp. 1091-1101.

SCHLEIZER, A. & BONNECAZE, R., 1999. Displacement of a Two Dimensional Immiscible Droplet Adhering to a Wall in Shear and Pressure-Driven Flows. *Journal of Fluids Mechanics*, Volume 383, pp. 29-54.

SOARES, E., CARVALHO, M. & MENDES, P., 2005. Immiscible Liquid-Liquid Displacement in Capillary Tubes. *Journal of Fluids Engineering*, Volume 125, pp. 24-31.

SOARES, E., CARVALHO, M. & MENDES, P., 2008. Immiscible Liquid-Liquid Displacement in Capillary Tubes: Viscoelastic Effects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanics, Science & Engineering*, pp. 160-165.

SOARES, E., CARVALHO, M. & SOUZA MENDES, P., 2006. Gas displacement of non-Newtonian liquids in capillary tubes. *International Journal Heat and Fluid Flow*, Volume 27, pp. 95-104.

SOARES, E. J. & THOMPSON, R. L., 2009. Flow regimes for the immiscible liquid-liquid displacement in capillary tubes with complete wetting of the displaced liquid. *Journal of Fluids Mechanics*, Volume 641, pp. 63-84.

SOUZA, D. A., SOARES, E. J., QUEIROZ, R. S. & Thompson, R. L., 2007. Numerical investigation on gas-displacement of a shear thinning liquid and a visco-

plastic material in capillary tubes. *Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics*, Volume 144, pp. 149-159.

TAYLOR, G., 1961. Deposition of a Viscous Fluid on the Wall of a Tube. *Journal of Fluids Mechanics*, Volume 10, pp. 161-165.

VANAPARTHY, S. & MEIBURG, E., 2008. Variable density and viscosity, miscible displacements in capillary tubes. *European Journal of Mechanics of Fluids*, Volume 27, pp. 268-289.