



## CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO HORIZONTAL DE FLUIDOS REOFLUIDIFICANTES

Rafael Baungartner

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Rio de Janeiro  
Julho de 2017

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO  
HORIZONTAL DE FLUIDOS REOFLUIDIFICANTES

Rafael Baungartner

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA MECÂNICA.

Examinada por:

---

Prof. Juliana Braga Rodrigues Loureiro, D.Sc.

---

Prof. Atila Pantaleão Silva Freire, Ph.D.

---

Prof. Fabio Antonio Tavares Ramos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL  
JULHO DE 2017

Baungartner, Rafael

Caracterização experimental do escoamento bifásico horizontal de fluidos reofluidificantes/Rafael Baungartner.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2017.

XVII, 92 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Mecânica, 2017.

Referências Bibliográficas: p. 87 – 90.

1. escoamentos bifásicos. 2. reofluidificante. 3. pressão diferencial. I. Loureiro, Juliana Braga Rodrigues. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Mecânica. III. Título.

# Agradecimentos

A Deus, por me permitir mais esta conquista.

A minha esposa Letícia, por todo apoio e carinho dedicado a cada dia de nossas vidas.

A professora Juliana Loureiro, pela confiança, suporte e ensinamentos dedicados na realização deste trabalho. Ao professor Átila Freire, pelas discussões e desafios apresentados para melhor evolução do trabalho.

A Petrobras, pela oportunidade de desenvolvimento proporcionada.

Aos colegas do Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos (NIDF), especialmente Laert, Gustavo, Cecília e Luiz, por todo auxílio e discussões que muito acrescentaram para a realização desta dissertação. Ao Gabriel, pela ajuda nas simulações e processamento de dados. Ao Alexandre, pela ajuda fundamental na construção da bancada.

A toda minha família, que sempre me incentivou na busca pelo conhecimento.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO HORIZONTAL DE FLUIDOS REOFLUIDIFICANTES

Rafael Baungartner

Julho/2017

Orientador: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Programa: Engenharia Mecânica

O presente trabalho propõe-se a investigar as propriedades globais e locais de um escoamento gás-líquido horizontal em regime pistonado, para três tipos de fluidos reofluidificantes.

Para a realização deste trabalho foi montado o aparato experimental, que foi testado inicialmente para validação com escoamentos ar-água. Foram preparados diferentes fluidos de trabalho para cada ensaio experimental e conduziu-se extensa campanha de medições.

As características do escoamento bifásico, como o comprimento e a velocidade das bolhas longas, o comprimento do pistão líquido e o seu grau de aeração foram medidos com uma câmera de alta velocidade através da técnica de Dimensionamento de Bolhas por Sombras (Shadow Sizer). O campo de velocidades da fase líquida foi medido através de Velocimetria por Imagem de Partículas. As características reológicas do fluido foram quantificadas por meio de ensaios em reômetro rotacional no início e ao final de cada ensaio experimental. Em adição, para cada teste foram medidas também a distribuição de pressão ao longo da tubulação de 12m de comprimento e as vazões de gás e de líquido na entrada da tubulação. Todas estas propriedades das fases líquida e gasosa foram quantificadas para três vazões de gás e três vazões de líquido distintas.

O objetivo final desta dissertação reside em analisar a influência das características reológicas da fase líquida no comportamento do escoamento bifásico pistonado. Os resultados serão utilizados para validar modificações de modelos mecanicistas para a previsão de propriedades globais e locais de escoamentos bifásicos.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

## EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF TWO-PHASE HORIZONTAL FLOW OF SHEAR-THINNING FLUIDS

Rafael Baungartner

July/2017

Advisor: Juliana Braga Rodrigues Loureiro

Department: Mechanical Engineering

The present work intends to investigate the local and global properties of a horizontal gas-liquid slug flow, in three different shear-thinning fluids.

To do so, an experimental testing bench was assembled and validated using an air-water slug flow. Three different working fluids were prepared to be used in the testing section, where an extensive experimental measurement campaign was carried out.

The main characteristics of the biphasic flow, such as bubbles length and velocity, slug length and aeration level were measured with a high speed camera through Shadow Sizer technic. The velocity field of the liquid phase was measured using Particle Image Velocimetry (PIV). The fluids rheological properties were quantified using a rotational rheometer in the beginning and at the end of each experiment. In addition, to each test, the pressure distribution was measured through the 12m long acrylic pipe, varying the gas and liquids flow rates. All this properties of liquid and gas phases were quantified for three gas and liquid flow rates, totalizing 9 different conditions for each fluid. Properties of the monophasic liquid flow were also evaluated for all fluids.

The main objective of this work is to analyze the influence of liquid phase rheological characteristics in slug flow behavior. The experimental results will be used to validate literature modifications to the mechanistic models used in slug flow local and global properties prediction.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xv</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações Iniciais . . . . .	1
1.2 Objetivos do Trabalho . . . . .	7
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>8</b>
2.1 Escoamentos multifásicos . . . . .	8
2.1.1 Correlações empíricas . . . . .	8
2.1.2 Modelos mecanicistas . . . . .	10
2.1.3 Métodos experimentais . . . . .	12
<b>3 Fundamentação teórica</b>	<b>14</b>
3.1 Classificação dos fluidos . . . . .	14
3.1.1 Fluidos newtonianos . . . . .	14
3.1.2 Fluidos não newtonianos . . . . .	15
3.1.3 Modelos reológicos . . . . .	18
3.1.4 Polímeros . . . . .	21
3.2 Padrões de escoamentos . . . . .	23
3.2.1 Mapas de padrões de escoamento . . . . .	24
3.2.2 Modelo de célula unitária . . . . .	25
<b>4 Método Experimental</b>	<b>28</b>
4.1 Aparato Experimental . . . . .	28
4.1.1 Preparação dos fluidos . . . . .	32
4.1.2 Caracterização dos fluidos . . . . .	33
4.1.3 Dimensionamento por Sombras (Shadow Sizer) . . . . .	35

4.1.4	Velocimetria por imagem de partículas (PIV) . . . . .	37
4.2	Descrição dos testes . . . . .	45
4.2.1	Teste de avaliação de perda de carga . . . . .	45
4.2.2	Teste de Dimensionamento por Sombras . . . . .	47
4.2.3	Teste de Velocimetria por Imagem de Partículas . . . . .	47
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
5.1	Testes com fluidos reofluidificantes . . . . .	51
5.1.1	Perda de carga . . . . .	54
5.1.2	Comprimento de bolhas . . . . .	55
5.1.3	Frequência de passagem de bolhas . . . . .	62
5.1.4	Velocidade de translação das bolhas . . . . .	63
5.1.5	Avaliação simultânea em duas estações . . . . .	65
5.2	Resultados PIV . . . . .	70
5.3	Comparação com os modelos teóricos . . . . .	76
5.3.1	Perda de carga . . . . .	76
5.3.2	Comprimento de bolha . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>84</b>
6.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	86
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>87</b>
<b>A</b>	<b>Parâmetros de ajuste do PIV</b>	<b>91</b>
A.1	<i>Software</i> Dynamic Studios 2015a . . . . .	91



# Lista de Figuras

1.1	Esquema do escoamento do fluido de perfuração na coluna de perfuração. Fonte: Celtique Energie. . . . .	3
1.2	Perfuração sub-balanceada. . . . .	4
1.3	Injeção de gás na coluna de perfuração. . . . .	5
3.1	Tipos de Fluidos Independentes do Tempo. Adaptado de CHHABRA (2008). . . . .	16
3.2	Comportamento esquemático das partículas presentes em fluidos reofluidificantes quando em repouso e quando submetidas a cisalhamento. Adaptado de BRUMMER (2006) . . . . .	17
3.3	Representação do modelo Lei de Potência. . . . .	19
3.4	Representação do Modelo de Cross. . . . .	19
3.5	Representação do Modelo Carreau-Yasuda. . . . .	20
3.6	Representação do Modelo de Herschel-Bulkley. . . . .	21
3.7	padrões de escoamento para mistura ar/água em tubulação horizontal de diâmetro 5,1mm. Adaptado de WEISMAN (1983) . . . . .	24
3.8	mapa de padrões em escoamento horizontal. Adaptado de CHHABRA (2008) . . . . .	25
3.9	Modelo de célula unitária. Adaptado de BANDEIRA (2016) . . . . .	25
4.1	Diagrama esquemático do circuito de testes. . . . .	28
4.2	Circuito de testes. . . . .	29
4.3	Diagrama esquemático do ponto de injeção de gás. . . . .	30
4.4	(a) Medidor de vazão eletromagnético (líquido), (b) Medidor de vazão por vortex( gás) e (c) Medidor de pressão diferencial. . . . .	30
4.5	Câmera de alta velocidade posicionada em frente à caixa de acrílico. . . . .	31
4.6	Início da pré-diluição do CMC em água, utilizando o agitador de bancada. . . . .	33
4.7	(a) Reômetro utilizado para caracterização dos fluidos, (b) detalhe geométrico do cone e placa utilizados. . . . .	34
4.8	Comprimento de bolha obtido com dimensionamento por sombras. . . . .	35

4.9	Etapas de funcionamento da técnica PIV (DANTEC DYNAMICS).	40
4.10	Quadro Único/Várias Exposições: (a) uma exposição, (b) duas exposições,(c) várias exposições - RAFFEL (2007).	42
4.11	Vários Quadros/Uma Exposição: (a) primeiro quadro/ primeira exposição, (b) Segundo quadro/ segunda exposição, (c) terceiro quadro terceira exposição -RAFFEL (2007).	43
4.12	Janelas de interrogação da técnica de PIV.	44
4.13	Exemplo do plano de correlação. Adaptado de Miranda (2004).	44
4.14	Perda de carga utilizando fluido newtoniano (água).	46
5.1	Perda de carga em tubulação lisa utilizando fluido newtoniano (água).	49
5.2	Condições experimentais situadas no mapa de padrões para escoamento horizontal. Adaptado de CHHABRA (2008).	50
5.3	Caracterização dos fluidos de trabalho:(a)Viscosidade e (b) Tensão de cisalhamento como função da taxa de deformação para as soluções de CMC a 25°C.	51
5.4	Padrões de escoamento ar-água para escoamento pistonado: (a) $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ , (b) $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (c) $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,43 \text{ m/s}$ .	52
5.5	Padrões de escoamento ar-0,05% CMC para escoamento pistonado: (a) $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ , (b) $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (c) $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,43 \text{ m/s}$ .	53
5.6	Padrões de escoamento ar-0,1% CMC para escoamento pistonado: (a) $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ , (b) $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (c) $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,43 \text{ m/s}$ .	53
5.7	Padrões de escoamento ar-0,2% CMC para escoamento pistonado: (a) $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ , (b) $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (c) $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,43 \text{ m/s}$ .	53
5.8	Perda de carga experimental para água e os três fluidos reofluidificantes testados: (a) $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , (b) $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , (c) $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ .	54
5.9	Efeitos da vazão e do índice de comportamento dos fluidos Lei de Potência no comprimento das bolhas - $l_f$ - (esquerda) e do pistão líquido - $l_s$ - (direita): comparação entre ar-água e (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.	56
5.10	Efeitos da vazão e do índice de comportamento dos fluidos Lei de Potência no comprimento unitário: comparação entre ar-água e (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.	57

5.11	Comparação das distribuições de comprimento de bolha e de pistão líquido para $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , nas condições de teste T1 e T3: (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC. . . . .	59
5.12	Comparação das distribuições de comprimento de bolha e de pistão líquido para $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , nas condições de teste T4 e T6: (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC. . . . .	60
5.13	Comparação das distribuições de comprimento de bolha e de pistão líquido para $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ , nas condições de teste T7 e T9: (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC. . . . .	61
5.14	Efeitos da velocidade superficial e do índice de comportamento dos fluidos Lei de Potência na frequência de bolhas: comparação entre ar-água e (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC. . . . .	62
5.15	Efeitos da vazão e do índice de comportamento dos fluidos Lei de Potência na velocidade de translação das bolhas ( $V_t$ ): comparação entre ar-água e (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC. . . . .	64
5.16	Efeitos da vazão e do índice de comportamento dos fluidos lei de potência na velocidade de translação das bolhas. . . . .	64
5.17	Comparação das distribuições de velocidade de translação das bolhas ( $V_t$ ): comparação entre (a) ar-água e (b) ar-solução 0,05% CMC, (c) ar-solução 0,1% CMC, (d) ar-solução 0,2% CMC. . . . .	65
5.18	Evolução do quantitativo de bolhas ao longo da tubulação, nas estações 1 e 2 do sistema. Solução CMC 0,1%. . . . .	66
5.19	Histogramas do comprimento de bolha e pistão líquido para a solução CMC 0,1%, $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ; $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ (T1), $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$ (T2) e $V_{SG} = 0,78 \text{ m/s}$ (T3). . . . .	67
5.20	Histogramas do comprimento de bolha e pistão líquido para a solução CMC 0,1%, $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ ; $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ (T4) e $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$ (T5). . . . .	68
5.21	Histogramas da velocidade de bolha para a solução CMC 0,1%, $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ; $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ (T1), $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$ (T2) e $V_{SG} = 0,78 \text{ m/s}$ (T3); $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ ; $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ (T4), $V_{SG} = 0,42 \text{ m/s}$ (T5). . . . .	69

5.22	Comparação das perfis de velocidade no escoamento de líquido nas concentrações 0,05, 0,1 e 0,2% de CMC, $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ . . . . .	70
5.23	Perfis de velocidade no escoamento bifásico nas concentrações 0,05, 0,1 e 0,2% de CMC e água, $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ e $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (a) pistão líquido e (b) filme líquido. . . . .	71
5.24	Perfis de velocidade no filme líquido para as concentrações de CMC 0,05% (a), 0,1% (b), 0,2% (c) e água (d). Condições de testes conforme Tabela 5.1: T1 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ ); T2 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$ ); T3 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,78 \text{ m/s}$ ); T4 ( $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ ). . . . .	72
5.25	Perfis de velocidade no pistão líquido para as concentrações de CMC 0,05% (a), 0,1% (b), 0,2% (c) e água (d). Condições de testes conforme Tabela 5.1: T1 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ ); T2 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$ ); T3 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,78 \text{ m/s}$ ); T4 ( $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ ). . . . .	73
5.26	Perfis velocidade ao redor do nariz da bolha para o fluido CMC 0,2%, $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ . . . . .	74
5.27	Perfis velocidade ao redor do nariz da bolha para o fluido CMC 0,1%, $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ . . . . .	74
5.28	Mapa de velocidade ao redor da bolha. CMC 0,1%, $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ : (a) pistão líquido, (b) nariz da bolha, (c) filme líquido e (d) cauda. . . . .	75
5.29	Mapa de velocidade ao redor da bolha. CMC 0,2%, $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ : (a) pistão líquido, (b) nariz da bolha, (c) filme líquido e (d) cauda. . . . .	75
5.30	Mapa de velocidade ao redor da bolha. CMC 0,2%, $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ e $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ : (a) pistão líquido, (b) nariz da bolha, (c) filme líquido e (d) cauda. . . . .	76
5.31	Comparação dos resultados experimentais de perda de carga com os modelos de DUKLER (1975) (esquerda) e ORELL (2005) (direita), para água e os três fluidos reofluidificantes testados: (a) $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , (b) $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , (c) $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ . . . . .	77
5.32	Comparação dos resultados experimentais de perda de carga com os modelos de DUKLER (1975) (esquerda) e ORELL (2005) (direita), adaptados aos efeitos da reologia, para água e os três fluidos reofluidificantes testados: (a) $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , (b) $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , (c) $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ . . . . .	79

5.33	Comparação dos resultados experimentais de comprimento de bolha com o modelo de Dukler (esquerda) e Orell (direita) para os três fluidos reofluidificantes testados: (a) CMC 0,05%: $n = 0,71$ , (b) CMC 0,1%: $n = 0,64$ , (c) CMC 0,2%: $n = 0,62$ . . . . .	81
5.34	Comparação dos resultados experimentais de comprimento unitário com o modelo de Dukler (esquerda) e Orell (direita) para os três fluidos reofluidificantes testados: (a) CMC 0,05%: $n = 0,71$ , (b) CMC 0,1%: $n = 0,64$ , (c) CMC 0,2%: $n = 0,62$ . . . . .	82
5.35	Comparação dos resultados experimentais com os modelos de Dukler (esquerda) e Orell (direita) para água: (a) comprimento de bolha e (b) comprimento unitário. . . . .	83

# Lista de Tabelas

5.1	Vazões dos testes com escoamento bifásico água e gás. . . . .	50
5.2	Propriedades reológicas dos fluidos. . . . .	51
5.3	Variação da perda de carga no escoamento bifásico dos fluidos a base de CMC em relação a água. Testes conforme a Tabela 5.1. . . . .	55
5.4	Média dos erros nas perdas de carga calculadas pelos modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005). . . . .	78
5.5	Média dos erros nas perdas de carga calculadas pelos modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005) considerando o fator de atrito para fluido não-newtoniano. . . . .	78
5.6	Média dos erros nos comprimentos unitários calculadas pelos modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005). . . . .	80

# Lista de Símbolos

$A$	área da seção transversal, p. 62
$D$	diâmetro interno do duto, p. 25
$M$	torque, p. 33
$T_r$	tempo de relaxação, p. 40
$U_g$	velocidade de sedimentação, p. 40
$V$	velocidade, p. 62
$V_L$	velocidade da fase líquida, p. 69
$V_m$	velocidade da mistura, p. 62
$V_t$	velocidade de translação da bolha, p. 62
$V_{SG}$	velocidade superficial do gás, p. 25
$V_{SL}$	velocidade superficial do líquido, p. 25
$W$	vazão mássica, p. 62
$\Omega$	velocidade angular, p. 34
$\dot{\gamma}$	taxa de cisalhamento, p. 14
$\lambda$	constante de tempo, p. 19
$\mu$	viscosidade dinâmica absoluta, p. 14
$\mu_0$	viscosidade do primeiro patamar Newtoniano, p. 20
$\mu_\infty$	viscosidade do segundo patamar Newtoniano, p. 20
$\rho$	massa específica, p. 62
$\tau$	tensão cisalhante, p. 14

$\theta$	ângulo do cone do reômetro, p. 34
$d_p$	diâmetro da partícula, p. 40
$g$	aceleração da gravidade, p. 40
$k$	índice de consistência, p. 18
$n$	índice de comportamento, p. 18
$r_c$	raio do cone do reômetro, p. 33



# Lista de Abreviaturas

CFD	computational fluid dynamics, p. 12
CMC	carboximethyl cellulose, p. 11
LED	diodo emissor de luz, p. 30
PAC	celulose polianiónica, p. 22
PIV	Velocimetria por Imagem de Partículas, p. 13
SCMC	sodio- carboximetil celulose, p. 12

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Considerações Iniciais

Os escoamentos de fluidos estão presentes na maioria dos fenômenos da natureza, como em processos geofísicos e biológicos, além de apresentarem grande importância em um vasto número de processos nos mais diversos ramos da indústria, como produção alimentícia, indústria química, geração de energia e produção de petróleo.

Na indústria do petróleo, por exemplo, podemos encontrar escoamentos de fluidos newtonianos e não newtonianos, nos padrões mono e multifásicos, escoando nas mais diversas geometrias, tanto em escoamentos horizontais quanto inclinados e verticais.

Neste cenário, podemos observar um grande avanço nas fronteiras exploratórias do mundo todo ao longo das últimas décadas, à medida que cresce a demanda por petróleo e seus derivados, e a disponibilidade e produtividade em regiões de fácil acesso torna-se cada vez menor.

A partir do descobrimento de reservatórios de petróleo e gás em áreas de difícil acesso, em especial nas profundezas dos oceanos, os métodos de produção até então utilizados deixaram de ser suficientes. Para superar os limites impostos pela natureza, onde estes novos reservatórios encontram-se sob mais de 2000 metros de lâmina d'água e, nas descobertas mais recentes, sob extensa camada de sal, onde a profundidade final pode passar dos 8000 metros, resultando em regiões de elevada pressão e temperatura, tornou-se cada vez mais importante que empresas e instituições de pesquisa busquem o desenvolvimento de tecnologias que permitam uma produção economicamente rentável.

Nestas condições, com escoamento simultâneo de líquido e gás, a correta previsão de suas características e a determinação de mecanismos de controle dos padrões de escoamento, são fundamentais para o projeto dos equipamentos e segurança operacional. Isso porque a presença de escoamentos em golfadas pode causar sérios danos à tubulação e principalmente aos equipamentos de separação e processamento, devido

às maiores variações nas condições de operação impostas pelo escoamento.

Outro problema da produção em escoamento multifásico é a corrosão interna dos dutos de transporte. A presença de elementos corrosivos no fluido, como o ácido carbônico, formado pela combinação de água com o dióxido de carbono presente no gás produzido, pode danificar seriamente as tubulações de aço carbono. Este processo corrosivo pode ser controlado com a utilização de inibidores de corrosão misturados ao fluido produzido, que têm sua eficácia diretamente ligada à distribuição de fases e velocidade do escoamento.

Por outro lado, o escoamento multifásico pode ser utilizado de forma benéfica como forma de facilitar o transporte do fluido até a superfície, método conhecido como elevação artificial, onde é feita injeção de gás na coluna de produção do poço para que o mesmo ajude a carregar fluido de maior densidade até a superfície, diminuindo ou mesmo eliminando a necessidade de bombeio mecânico.

Na indústria petrolífera, é comum também a presença de fluidos não newtonianos, principalmente aqueles com propriedades reofluidificantes, ou seja, fluidos que apresentam uma diminuição de viscosidade quando submetidos ao cisalhamento, ou em outras palavras, quando são bombeados. Estes fluidos possuem características ideais para serem aplicados como auxiliares na perfuração. De acordo com THOMAS (2004), estes fluidos de perfuração tem como principais funções remover o cascalho e detritos gerados pela broca de perfuração e transportá-los até a superfície, manter a pressão hidrostática no poço sob controle, de modo a evitar um influxo de gás proveniente da formação, estabilizar as paredes do poço e resfriar e lubrificar a broca de perfuração. Para isso, o fluido deve ter uma série de características específicas a sua aplicação, tais como: deve ser quimicamente estável; servir de reforço à parede do poço, evitando seu colapso; manter sólidos em suspensão quando em repouso; ser tratável, física e quimicamente, para reaproveitamento e descarte; ser bombeável; e ter um custo compatível com a operação a ser realizada. Para obter estas propriedades, os fluidos de perfuração podem ser formados por uma complexa mistura de líquidos, materiais particulados, aditivos químicos e até mesmo gases.

Ao serem injetadas através da coluna de perfuração, estas soluções reofluidificantes escoam com relativa facilidade devido à elevada taxa de cisalhamento que reduz consideravelmente a sua viscosidade, diminuindo assim a energia gasta para o bombeamento, e conseqüentemente o custo. Ao chegar à formação rochosa, na região onde a broca de perfuração está operando, ocorre uma redução brusca de velocidade devido ao acréscimo da área de escoamento, e conseqüente diminuição do cisalhamento. Desta forma, o fluido torna-se mais viscoso, condição necessária para que o mesmo carregue o cascalho gerado pela perfuração, e possa transportá-lo até a superfície, onde será separado do fluido para receber a correta destinação. A Figura 1.1 mostra um esquema da injeção do fluido no poço e retorno até a superfície.

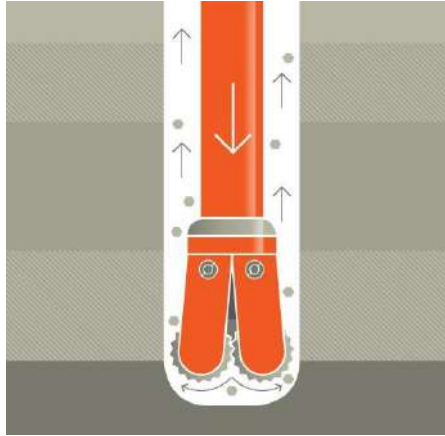


Figura 1.1: Esquema do escoamento do fluido de perfuração na coluna de perfuração. Fonte: Celtique Energie.

Durante a perfuração do poço de petróleo é normal a ocorrência de influxo de gás na coluna de perfuração devido ao gás dissolvido no reservatório, gerando um escoamento de líquido com bolhas dispersas. Quando porém a quantidade de gás que entra na coluna é muito grande, este influxo pode colocar em risco a operação. Isso ocorre quando se atinge uma região da formação rochosa onde a pressão de poros seja superior à pressão resultante da coluna de fluido de perfuração. Este fenômeno pode ocorrer também mediante uma falha de bombeamento no fluido de perfuração, fazendo com que a concentração de gás da formação na coluna aumente. Ocorrendo este fenômeno, é necessário cessar o influxo e remover o gás da coluna, evitando a perda de controle do escoamento no poço devido à elevação da pressão, que pode resultar em sérios danos à sonda e ao meio ambiente, além de colocar em risco a segurança dos trabalhadores.

Durante a ocorrência do influxo de gás o escoamento é predominantemente pistonado, caracterizado pela presença de grandes bolhas de aspecto cilíndrico e diâmetro próximo ao da tubulação, intercaladas por pistões de líquido, podendo ocorrer a presença de bolhas de gás dispersas nestes pistões. Este escoamento, na parte inicial do poço, em toda a extensão do reservatório, é predominantemente horizontal, passando em seguida para o trecho vertical da coluna, representando um fenômeno de grande importância para a indústria petrolífera.

Considerando ainda a perfuração em águas ultra profundas, à medida que a profundidade aumenta, observamos uma diminuição na janela operacional de perfuração, ou seja, a diferença entre a pressão de poros e a pressão de fratura da formação. Visando contornar este problema foram desenvolvidos alguns métodos de controle da pressão na coluna de perfuração. Os mais usados são a perfuração com gerenciamento de pressão, ou MPD (*Managed Pressure Drilling*), que trabalha com um rigoroso controle da pressão no fundo do poço, e a perfuração sub-

balanceada, ou UBD (*Underbalanced Drilling*), onde a perfuração é realizada com pressão no fundo do poço abaixo da pressão de poros, de modo que haja uma vazão constante de fluidos da formação para o poço.

Na perfuração com gerenciamento de pressão, a parte superior do poço é equipada para controlar a pressão no fundo do poço, de modo a mantê-la pouco acima da pressão de poros, para que não ocorra influxo de fluidos do reservatório no poço. Para isso, o fluido de perfuração utilizado será de base líquida, de modo que as medidas de pressão do fundo do poço possam ser transmitidas através de pulsos de pressão pela coluna de líquido. Dentre as principais vantagens deste tipo de perfuração pode-se destacar o controle mais simples do poço e seu menor custo quando comparado à perfuração sub-balanceada. Por outro lado, o mesmo está restrito a condições de reservatórios sem presença de gás na formação e a reservatórios não fraturados ou suscetíveis a danos consideráveis devido à pressão no poço ser superior à pressão de poros.

Por outro lado, o método de maior interesse para este trabalho é o de perfuração sub-balanceada, mostrado na Figura 1.2, o qual se utiliza de equipamentos e procedimentos adequados para se manter, intencionalmente, a pressão exercida no poço menor que a pressão de poros em qualquer parte da formação exposta, com a intenção de produzir fluido de perfuração para a superfície.

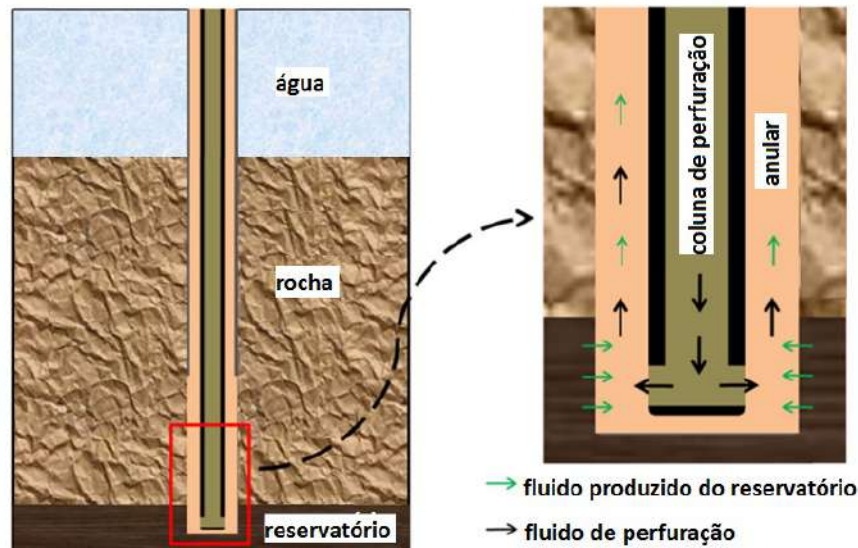


Figura 1.2: Perfuração sub-balanceada.

Em formações com maior incidência de falhas geológicas ou com presença de rochas de menor resistência, opta-se por realizar a perfuração sub-balanceada, pois, caso a pressão exercida pelo fluido seja superior à pressão de poros, o fluido pode danificar a estrutura porosa da rocha ou mesmo penetrar nesta, causando o entupimento dos poros próximos à região perfurada, e a consequente redução da produtividade do reservatório, quando em operação.

Para que isso ocorra, recorre-se, essencialmente, à injeção de gás juntamente com o fluido de perfuração, de modo a criar um padrão aerado de menor densidade, resultando, por consequência, em um escoamento multifásico ao longo do poço. O gás utilizado pode ser ar, nitrogênio ou gás natural, enquanto a fase líquida pode ser a base de água ou óleo, além de diversos aditivos que, dentre outras funções, podem ter a propriedade de conferir a característica de variação da viscosidade aparente com a variação do cisalhamento aplicado. A injeção de gás na coluna de perfuração pode ocorrer de três maneiras distintas, conforme demonstrado na Figura 1.3: injeção pela coluna de perfuração, injeção por tubulação auxiliar ou por revestimento auxiliar.

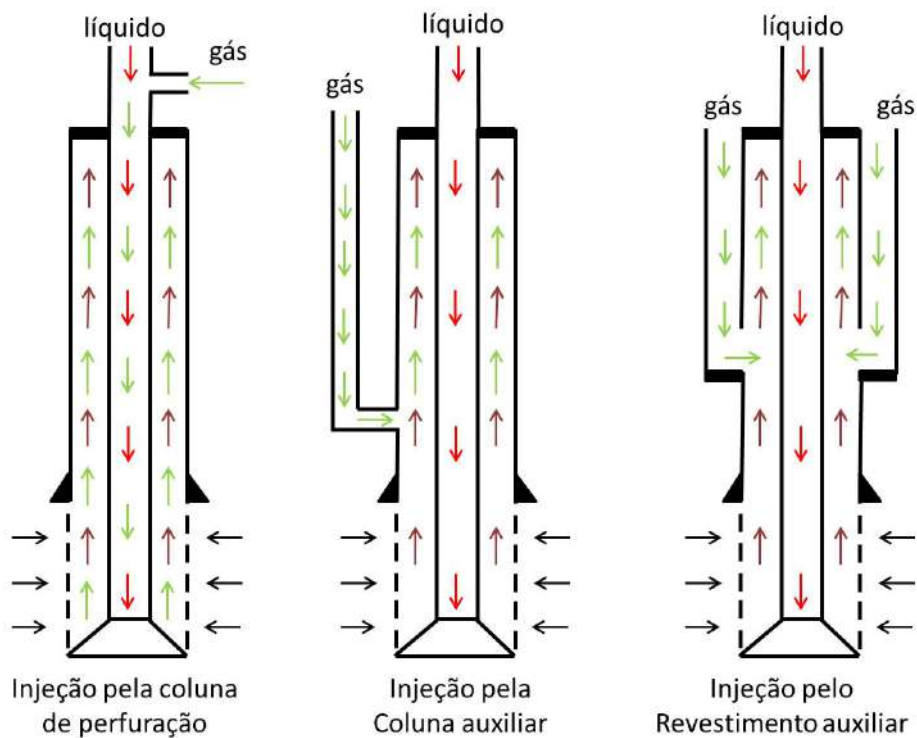


Figura 1.3: Injeção de gás na coluna de perfuração.

A injeção de gás pela coluna de perfuração tem como vantagens não necessitar de equipamentos diferenciados instalados no fundo do poço, a possibilidade de obter pressões de fundo mais baixas do que as obtidas nos outros métodos, a melhor limpeza do poço devido ao escoamento bifásico ocorrer em toda a extensão do poço e a menor vazão de gás necessária. Por outro lado, a manutenção da pressão no fundo é dificultada devido à interrupção da vazão de gás a cada conexão de um novo trecho de tubulação. Outro fator negativo é a necessidade de utilizar tubos de perfuração instrumentados para avaliar a pressão no fundo do poço, visto que os métodos convencionais de medição são baseados nos pulsos de pressão conduzidos pelo próprio fluido de perfuração, e não funcionam na presença de gás na coluna.

Os métodos de injeção por tubulação auxiliar, que desce acompanhando a coluna

de perfuração, e por revestimento auxiliar, não necessitam de interrupção da injeção de gás durante as conexões da coluna, visto que a linha de gás é separada da coluna de perfuração até o ponto de injeção, facilitando a manutenção da pressão de fundo e a utilização de instrumentação convencional para medição de pressão. Porém, nestes métodos, a injeção de gás ocorre distante da broca, em uma posição mais elevada, fazendo com que a pressão no fundo do poço seja mais alta que aquela obtida na injeção pela coluna de perfuração. Além disso, a limpeza dos detritos gerados na perfuração é prejudicada pela menor vazão na região de perfuração.

Os principais benefícios da perfuração sub-balanceada são:

- Maior taxa de penetração, quando comparada à perfuração convencional, reduzindo assim o tempo gasto para perfurar o poço;

- Menor desgaste da broca, devido à menor resistência para remover o cascalho, gerando assim menor atrito;

- Menor risco de aprisionamento da coluna de perfuração. Na perfuração convencional a pressão superior à pressão de poros faz com que os sólidos em suspensão penetrem na parede do poço formando uma espécie de reboco. Devido à alta pressão, este reboco pode atuar na parede da coluna de perfuração de tal forma que a força axial para girar a coluna seja superior a sua resistência, ocasionando sua quebra ou aprisionamento. Como na perfuração sub-balanceada não ocorre a formação deste reboco, o risco de aprisionamento devido a este fator é eliminado;

- Menor perda de circulação. Quando o fluido de perfuração invade o reservatório devido à elevada pressão no poço e o fluido não retorna à superfície, ocorre a chamada perda de circulação. Esta pode representar um custo considerável, uma vez que todo o fluido que não retorna deve ser repostado para continuar a perfuração. Além disso, caso o fluido perdido danifique o reservatório, resultará em maiores prejuízos devido à menor produção obtida no poço. Mantendo-se a pressão abaixo da pressão de poros evita-se a perda de circulação;

- Possibilidade de avaliar o reservatório durante a perfuração. Como durante a perfuração ocorre o influxo controlado de fluidos do reservatório para a superfície, é possível, ainda nesta fase, a detecção da presença de óleo ou gás. Na perfuração convencional ou com gerenciamento de pressão, esta avaliação ocorre apenas no teste de formação.

Outras áreas que apresentam escoamentos de fluidos não newtonianos em grandes quantidades são a indústria alimentícia, com o processamento e embalagem de alimentos líquidos ou pastosos, como cremes, geleias e molhos, e a indústria de cosméticos. Percebe-se, portanto, a grande importância do estudo de escoamentos bifásicos de fluidos não newtonianos e a necessidade de um correto entendimento de todos os processos envolvidos.

## 1.2 Objetivos do Trabalho

O objetivo geral deste trabalho é investigar o comportamento de escoamentos bifásicos de fluidos reofluidificantes e gás em tubulações horizontais, em diferentes vazões de gás e líquido. Para isso, uma bancada experimental foi construída e instrumentada, visando avaliar experimentalmente o comportamento destes fluidos sob condições controladas.

Dentro da proposta apresentada, os objetivos específicos do trabalho são:

- caracterizar os parâmetros do escoamento bifásico de fluidos reofluidificantes, de modo que seja possível um melhor entendimento do seu comportamento.

- levantar curvas de perda de carga para os diferentes fluidos utilizados, tanto no escoamento de líquido quanto no escoamento bifásico, e compará-las com as de fluido newtoniano (água).

- determinar, com o uso do dimensionamento por sombras (shadow sizer), formato, comprimento e frequência das bolhas presentes no escoamento, e a influência das propriedades dos fluidos e das vazões de líquido e gás sobre estas características.

- determinar as características reológicas dos fluidos preparados para experimentação com o uso de polímeros, verificando a influência das propriedades específicas de cada fluido sobre as condições de escoamento.

- comparar os dados obtidos com os modelos teóricos disponíveis na literatura, desenvolvidos para fluidos newtonianos, e verificar a utilização de adaptações que agreguem conceitos pertinentes ao escoamento de fluidos reofluidificantes.



# Capítulo 2

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 Escoamentos multifásicos

Escoamentos multifásicos estão presentes em grande quantidade nos diversos ramos da indústria, como química, petroquímica e alimentícia, onde o comportamento dos materiais envolvidos é influenciado por uma série de propriedades dos componentes, como suas características newtonianas ou não newtonianas, tamanho, formato e concentração de partículas, vazão de cada fase e até mesmo a geometria do sistema.

Devido a esta grande importância, torna-se fundamental o correto entendimento dos fenômenos envolvidos, motivo pelo qual estes escoamentos tem sido tema de estudo de vários autores nas últimas décadas.

A análise de escoamentos multifásicos pode ser realizada utilizando-se de três metodologias distintas de modelagem: correlações empíricas, modelos mecanicistas e modelagem numérica. No presente trabalho serão utilizados os modelos mecanicistas e correlações empíricas disponíveis na literatura, elaborados para descrever o comportamento dos fluidos newtonianos. Será realizada uma comparação dos modelos disponíveis com os dados experimentais obtidos, inicialmente para fluidos newtonianos (água/ar) e posteriormente com os resultados dos testes com fluidos reofluídificantes, realizando, caso necessário, ajustes nos modelos para englobar as características provenientes do comportamento não newtoniano.

#### 2.1.1 Correlações empíricas

Correlações empíricas são baseadas exclusivamente na observação do fenômeno, não considerando a base teórica por trás do mesmo. O uso de correlações empíricas visa simplificar o comportamento observado em determinada situação experimental, representando a mesma a partir da relação dos seus parâmetros principais obtidos experimentalmente. Apesar de em muitos casos produzirem resultados satisfatórios, estas correlações normalmente tem sua aplicação restrita às condições nas quais

foi obtida a base de dados necessária à sua elaboração, podendo em alguns casos serem estendidas para condições semelhantes. Ao longo das últimas décadas, vários trabalhos apresentaram correlações para diferentes problemas de escoamento bifásico em tubulações, fornecendo parâmetros para a predição de dados como queda de pressão, tensões de cisalhamento, tensões superficiais e frações de líquido e gás.

LOCKHART (1945) apresentou uma das primeiras correlações para a queda de pressão no escoamento bifásico horizontal assumindo que as quedas de pressões estáticas devem ser iguais para as duas fases presentes, independente da posição na tubulação e que as somas dos volumes de líquido e gás deve ser igual ao volume total da tubulação. Como consequência, o padrão de escoamento deve ser igual em toda extensão do escoamento, não sendo consideradas possíveis interações entre as fases. Outros autores como BEATTIE (1982) e MULLER-STEINHAGEN (1986) propuseram correlações mais simples e intuitivas que aquela proposta por LOCKHART apresentando resultados melhores que este.

A partir de dados obtidos utilizando a técnica de escaneamento do perfil vertical do escoamento por meio da absorção de raios gama, HEYWOOD (1979) apresentou correlações para a obtenção de frequência e comprimento de pistão líquido e frações de líquido e gás, bem como para a perda de carga na tubulação. HART (1989) avaliou dados disponíveis na literatura e propôs correlações para quedas de pressão e frações de líquido e gás considerando escoamentos com baixas frações de líquido.

Também utilizando apenas fluidos newtonianos, HOUT (2002) avaliou a velocidade de translação de bolhas em tubulações horizontais e inclinadas, comparando os resultados com as correlações empíricas presentes na literatura.

Considerando agora os fluidos não newtonianos, temos o trabalho de ROSEHART (1975) que realizou experimentos para caracterizar a fração de vazios, velocidade e frequência de bolhas em uma tubulação de 2,54 *mm* de diâmetro. As medições foram efetuadas utilizando um medidor capacitivo construído para o experimento. Correlações para fração de vazios, velocidade e frequência de bolhas foram apresentadas, levando em consideração os efeitos da reologia dos fluidos utilizados.

XU (2009) avaliou experimentalmente a redução de arrasto por injeção de gás em fluidos não newtonianos. Os experimentos foram conduzidos de modo a avaliar a queda de pressão utilizando soluções ar/CMC, com velocidades superficiais de líquido entre 0 e 1,42 *m/s* e velocidades superficiais de gás entre 0,17 e 2,59 *m/s*. Os autores apresentam uma correlação para o cálculo da perda de carga em tubulação utilizando fluidos Lei de Potência.

Finalmente, SCHULKES (2011) analisou os dados de frequência de passagem de bolhas de diversos trabalhos existentes na literatura, propondo uma correlação baseada em análise de grupos adimensionais para descrever o comportamento do escoamento em diversas condições. Esta correlação será utilizada adiante para com-

paração com os resultados obtidos neste trabalho.

### 2.1.2 Modelos mecanicistas

Os modelos mecanicistas visam descrever o fenômeno físico levando em consideração os processos de maior importância presentes no mesmo, e desprezam as variáveis de menor influência, cujas ausências não implicam na descaracterização do fenômeno, ou não afetam de maneira significativa os resultados obtidos.

Devido à grande instabilidade presente nos escoamentos bifásicos, algumas variáveis como a variação do comprimento de bolha, forma da bolha e pistão de líquido e a variação de velocidade da bolha não são consideradas na maioria dos modelos, sendo considerado sempre um valor médio. Desta forma, os modelos visam descrever o fenômeno com os dados de maior importância como velocidade, queda de pressão, comprimento médio de bolha e frações de cada fase.

Neste contexto, vários autores propuseram modelos desde os mais simples, como DUKLER (1975) até modelos mais complexos como os de BARNEA (1993) e ORELL (2005). O modelo de DUKLER descreve detalhadamente o comportamento hidrodinâmico instável do escoamento pistonado gás-líquido. O autor descreve a região de mistura na frente do pistão e propõe um método para determinar a fração do fluido incorporado no processo, bem como a fração perdida na região turbulenta após sua passagem. O modelo permite prever a velocidade dos fluidos, velocidade do nariz da bolha, comprimento do pistão líquido e da bolha, e formatos dos mesmos.

TAITEL (1977) apresentou um modelo para prever a frequência de formação de bolhas para escoamentos multifásicos em tubulações, com base na observação do fenômeno natural de ondulações instáveis na interface gás-líquido.

Utilizando o conceito de velocidade de deriva proposto por NICHOLSON (1978), e o modelo de MARON (1982) baseado nas distorções periódicas na camada limite, DUKLER (1985) propôs um modelo para determinar o mínimo comprimento estável de um pistão líquido em tubulações horizontais e verticais. O modelo é baseado no relaxamento da camada limite na frente do pistão e na sua reconstrução parte traseira do mesmo.

BARNEA (1993) apresentou um modelo para a distribuição de comprimento de pistão ao longo da tubulação. O mesmo é baseado no mecanismo de ultrapassagem e coalescência das bolhas, que ocorre devido ao fato de a velocidade de translação de uma bolha longa atrás de um pistão curto ser consideravelmente superior àquela de uma bolha atrás de um pistão longo.

ANDREUSSI (1993) realizou experimentos em tubulações de 31 e 53 *mm* com escoamento bifásico água/ar, visando obter características relativas ao tamanho das bolhas dispersas no pistão líquido e à aeração do filme líquido sob a bolha. Foram

medidos o comprimento das bolhas e o comprimento da região de mistura, altamente aerado, após a bolha. Os autores apresentam uma correlação para a fração de vazios que descreve o comportamento de forma mais assertiva que aquela apresentada por DUKLER (1975).

COOK (1995) avaliou o escoamento bifásico newtoniano de tubulações de 32 e 50 *mm* de diâmetro, mensurando diversas propriedades do escoamento, tais como velocidade da bolha, frequência, comprimento, fração de gás, queda de pressão e altura do filme líquido. Os resultados foram comparados com os modelos de DUKLER (1975), NICHOLSON (1978) e TAITEL (1976), utilizando apenas variáveis medidas experimentalmente, mostrando que, para as condições testadas, o modelo de Dukler apresenta os melhores resultados. Em outro trabalho, COOK (2000) discorreu sobre os efeitos do gás arrastado dentro do pistão sobre a tensão de cisalhamento na parede da tubulação, propondo que as bolhas de gás se comportassem como esferas rígidas aumentando a viscosidade da mistura. Este efeito foi considerado como um fator extra de perda de carga, utilizando um termo de viscosidade efetiva para o escoamento.

Por fim, ORELL (2005) utilizou o modelo simplificado de TAITEL (1977) para o escoamento pistonado, acrescentando a queda de pressão adicional proposta por COOK (2000), aumentando assim a precisão dos gradientes de pressão estimados. O modelo foi testado utilizando dados disponíveis na literatura para uma grande variedade de condições.

Outros autores, como XU (2007), JIA (2011), LI (2014) e PICCHI (2015), entre outros, propuseram modelos considerando os efeitos do escoamento não newtoniano, conforme apresentado a seguir:

XU (2007) estudou o escoamento gás / não newtoniano em tubulações inclinadas com 3 diâmetros distintos, propondo um modelo considerando o escoamento estratificado inclinado. O modelo de TAITEL (1977) para queda de pressão foi adaptado para o escoamento de fluido Lei de Potência, sob a mesma condição.

JIA (2011) apresentou um modelo para escoamento multifásico de fluidos não newtonianos usando a aproximação de TAITEL (1976) para escoamento estratificado. O modelo de unidade de pistão usando abordagem mecânica foi adotado para estimar os gradientes de pressão. Os resultados são comparados com dados experimentais e outros provenientes de simulações CFD .

LI (2014) desenvolveu um modelo analítico para escoamento estratificado de fluido não newtoniano e gás, prevendo a queda de pressão e fração de gás no pistão líquido. O formato da interface foi calculado resolvendo a equação de Young-Laplace.

PICCHI (2015) analisou experimentalmente o escoamento gás/não newtoniano, e propôs um modelo baseado no de ORELL (2005), realizando um balanço de massa e momento na célula unitária, mas levando em consideração a reologia dos fluidos

Lei de Potência. Neste trabalho experimental, foram estudadas três condições de escoamento: estratificado, pistonado e pistonado severo, utilizando três concentrações distintas de SCMC (sodio- carboximetil celulose) para preparar os fluidos não newtonianos. Uma nova correlação para o cálculo da frequência de bolha é apresentada, considerando os efeitos dos fluidos Lei de Potência.

ANBARLOOEI (2015) propôs uma nova formulação para o fator de atrito para o escoamento turbulento de fluidos Lei de Potência, derivada a partir da análise do fator de atrito baseada na escala de Kolmogorov. Esta formulação será aplicada nos modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005), para comparação dos resultados experimentais deste trabalho com os modelos teóricos, considerando os efeitos dos Fluidos Lei de Potência.

### 2.1.3 Métodos experimentais

Os trabalhos a seguir apresentados possuem relevâncias quanto às metodologias e técnicas experimentais utilizadas, as quais foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho:

PINHO (1990) avaliou o comportamento das características do escoamento turbulento de fluidos não newtonianos a base de carboximethyl celulose (CMC) em concentrações de 0,1 a 0,4% em peso. As componentes de velocidade média e tensões normais foram obtidas com o uso de velocimetria por imagem de partículas (PIV).

PEREIRA (2000) estudou o escoamento de fluidos não newtonianos em uma expansão abrupta vertical, obtendo as características do escoamento turbulento por anemometria Laser-Doppler e comparando os resultados com o escoamento da água.

SOLEIMANI (2002) analisou o escoamento em uma tubulação de 2,54 *mm*, reportando que a adição de polímeros redutores de arrasto pode influenciar a formação de ondas superficiais no escoamento bifásico, que dependem majoritariamente do nível de turbulência no escoamento.

PEREIRA (2002) estudou os efeitos de redução de perda de carga em fluidos não newtonianos de base água com laponite e Carboximetilcelulose (CMC), em escoamentos monofásicos turbulentos. Foram obtidas reduções de perda de carga da ordem de 50% em determinadas condições de escoamento. Velocidades médias e turbulentas do escoamento foram obtidas para uma série de condições e concentrações de laponite, utilizando anemometria Laser-Doppler.

KAWAGUCHI (2002) estudou o efeito da presença de partículas redutoras de arrasto no escoamentos de fluidos em um canal. Utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV), foi avaliada a distribuição espacial das velocidades do escoamento e a influência da presença das partículas diluídas em água, comparando com o fluido puro.

NOGUEIRA (2003) apresentou um procedimento de testes para a aplicação de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) combinado ao dimensionamento por sobras (shadow sizer) utilizando uma única câmera. O escoamento de bolhas de Taylor em solução aquosa de glicerol, em uma tubulação vertical foi avaliado, obtendo os perfis de velocidade ao redor da bolha.

DZIUBINSKI (2004) estudou experimentalmente o comportamento de fluidos não newtonianos em escoamentos verticais, apresentando um mapa de padrões de escoamento, utilizando CMC em concentrações que proporcionavam  $n$  variando entre 0,704 e 0,967.

MAGALHÃES (2013) avaliou experimentalmente o escoamento água/CO<sub>2</sub> e água/ar em uma tubulação horizontal utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) e dimensionamento por sobras. Perfis de velocidade local para o pistão líquido e para o filme líquido foram apresentados, bem como suas distribuições de probabilidade de comprimento para as condições ensaiadas.

MATAMOROS (2014) investigou a morfologia de bolhas alongadas em escoamento em tubulações horizontais utilizando a técnica captura de imagem com câmera de alta velocidade, caracterizando aspectos tridimensionais das bolhas, como dimensões do nariz, corpo, ressalto hidráulico e cauda, além da área interfacial gás/líquido. Aplicando técnicas de tratamento de imagem e computação numérica, as informações obtidas foram contrastadas com modelos teóricos disponíveis.

SUAREZ (2016) estudou o comportamento de escoamentos pistonados horizontais sujeitos a injeção de gás na lateral da tubulação, variando o ângulo de injeção. Utilizando dimensionamento por sombras, foi avaliada a morfologia das bolhas formadas sob cada condição de injeção de gás.

BANDEIRA (2016) investigou as alterações provocadas nas características do escoamento pistonado horizontal devido à presença de injeção de fluido nas paredes da tubulação. O autor apresenta também uma análise dos modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005), detalhando os dois modelos e propondo alteração aos mesmos para incluir os efeitos da transpiração na parede.

# Capítulo 3

## Fundamentação teórica

### 3.1 Classificação dos fluidos

Segundo CHHABRA (2008), os fluidos podem ser classificados seguindo dois critérios: conforme sua resposta à pressão aplicada ou de acordo com os efeitos observados quando o mesmo é submetido à tensão de cisalhamento. O primeiro critério leva às definições de compressível ou incompressível, dependendo do fato de o volume de um elemento de fluido ser ou não sensível à pressão nele aplicada. Enquanto a compressibilidade normalmente influencia as características de escoamento dos gases, os líquidos são tratados normalmente como fluidos incompressíveis, e é a sua resposta ao cisalhamento que apresenta maior influência. Conforme este critério, podemos classificá-los em fluidos newtonianos e fluidos não newtonianos.

#### 3.1.1 Fluidos newtonianos

Os fluidos newtonianos apresentam como principal característica a proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, quando em regime laminar. Isso significa que, para um dado fluido, a viscosidade é constante para diferentes taxas de cisalhamento e não varia com o tempo, dependendo apenas da temperatura e da pressão. O comportamento destes fluidos pode ser expresso pela Lei de Newton da Viscosidade,

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (3.1)$$

onde  $\tau$  é a tensão cisalhante,  $\mu$  representa a viscosidade dinâmica absoluta e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento. São classificados nesta categoria todos os gases, líquidos não poliméricos como água, álcool, benzeno, glicerina, soluções salinas e óleos vegetais.

### 3.1.2 Fluidos não newtonianos

Ao contrário dos fluidos newtonianos, nos fluidos não newtonianos a curva tensão de cisalhamento versus taxa de deformação não é linear, quando em regime laminar, ou esta curva não passa pela origem. Conforme CHHABRA (2008), isso ocorre quando a viscosidade aparente (tensão de cisalhamento dividida pela taxa de deformação) não é constante para uma dada temperatura e pressão, dependendo das condições de escoamento, geometria, taxa de deformação, ou mesmo do histórico cinemático do fluido em questão. Estes fluidos podem ser classificados em três categorias distintas:

1 - fluidos cuja taxa de deformação depende exclusivamente da tensão de cisalhamento em determinado ponto e instante de tempo. Estes fluidos são chamados “independentes do tempo”, “puramente viscosos” ou “inelásticos”;

2 - fluidos mais complexos onde a relação entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação depende adicionalmente da duração de deformação e do histórico cinemático são conhecidos como “dependentes do tempo”;

3 - fluidos que apresentam características de fluidos ideais e também de sólidos elásticos, apresentando uma recuperação elástica parcial após sofrer deformação são conhecidos como “fluidos viscoelásticos”.

Dentre os fluidos Independentes do Tempo, uma segunda classificação é estabelecida tendo por base as características da curva tensão versus taxa de deformação, conforme mostrado na Figura 3.1. De acordo com esta classificação, a qual são associados modelos matemáticos que descrevem cada comportamento de curva, os fluidos não newtonianos são divididos em:

- fluidos de Bingham;
- fluidos reoespessantes;
- fluidos reofluidificantes.

#### Fluidos de Bingham

Também chamados plásticos de Bingham, apresentam um comportamento de sólido para baixos valores de tensão de cisalhamento, e um comportamento de fluido newtoniano quando aquela tensão atinge um determinado valor crítico. Os fluidos de Bingham normalmente têm, em repouso, uma estrutura tridimensional de rigidez suficiente para resistir a algumas tensões até a tensão limite. Se esta tensão limite é excedida, a estrutura se desintegra e o sistema passa a apresentar o comportamento de um fluido Newtoniano. Quando o fluido é deixado em repouso novamente, a estrutura pode ser novamente formada ou não. Alguns exemplos de materiais com este comportamento são a pasta de dente, alguns tipos de lama e a massa de modelar.



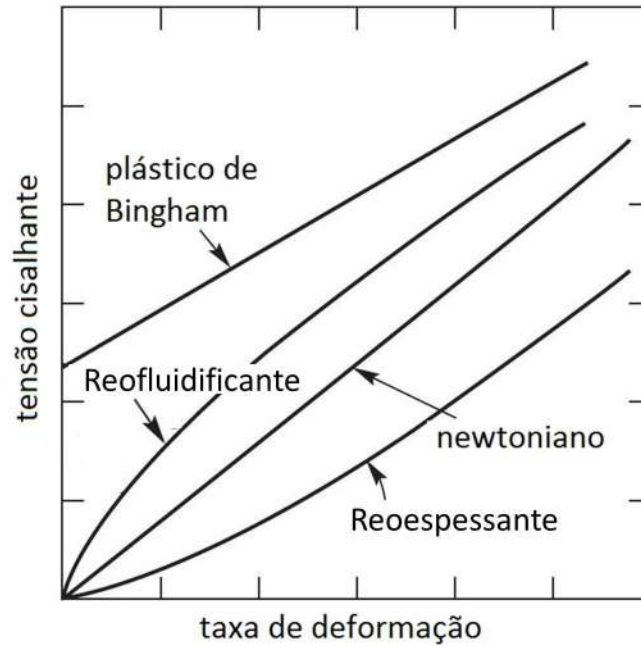


Figura 3.1: Tipos de Fluidos Independentes do Tempo. Adaptado de CHHABRA (2008).

### Fluidos reoespesantes

Os fluidos reoespesantes têm como característica a dependência da viscosidade com a taxa de cisalhamento, onde as substâncias têm sua viscosidade aumentada com o aumento da taxa de cisalhamento. Partículas sólidas misturadas com líquidos em suspensões altamente concentradas podem exibir este tipo de comportamento reológico, porém o mesmo só ocorre em situações muito especiais, como em mistura de areia em água e suspensões de amido em solventes orgânicos, sendo portanto de menor importância prática.

### Fluidos reofluidificantes

Os fluidos reofluidificantes são líquidos que apresentam um decréscimo de viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, de forma mais ou menos pronunciada. Segundo GOVIER (1977), este tipo de comportamento é largamente encontrado em soluções ou suspensões nas quais grandes moléculas ou pequenas partículas formam agregados de pequena atração ou agrupamentos alinhados que são estáveis e reprodutíveis em qualquer taxa de deformação estabelecida, mas com a capacidade de romper esta ligação com o aumento da taxa de cisalhamento, ou se reordenar e reagrupar com a diminuição da mesma.

Conforme pode ser observado na figura 3.2, cada acréscimo na taxa de cisalhamento representa um aumento de organização das partículas no meio e, portanto, uma queda na viscosidade, respeitando as características de cada substância.

Esta melhor organização pode ocorrer por diversos fatores relativos ao escoamento, quando comparado ao estado de repouso:

- moléculas ou partículas em orientação aleatória são alinhadas segundo o sentido do escoamento, permitindo que escorreguem umas sobre as outras de forma mais fácil, reduzindo assim a viscosidade;
- moléculas redobradas do tipo cadeia podem se desenroscar e esticar, adquirindo uma orientação paralela favorável ao escoamento;
- partículas esféricas são deformadas no sentido da vazão;
- partículas ou moléculas agrupadas são desagregadas.

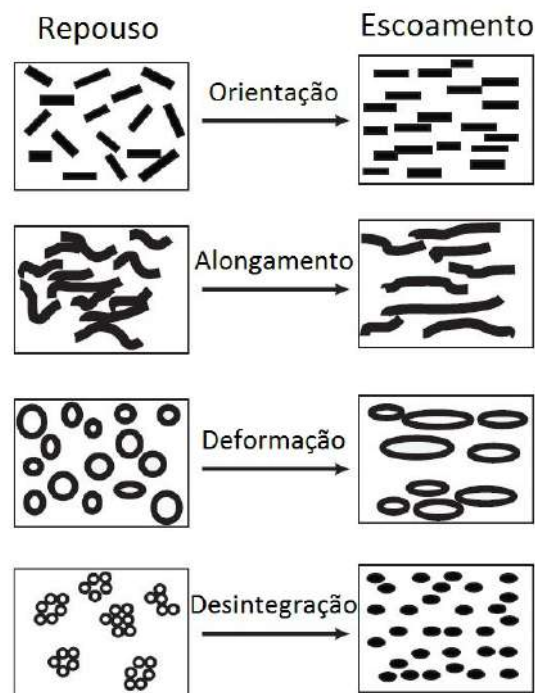


Figura 3.2: Comportamento esquemático das partículas presentes em fluidos reofluidificantes quando em repouso e quando submetidas a cisalhamento. Adaptado de BRUMMER (2006)

Para a maior parte dos líquidos reofluidificantes, tal efeito de diminuição da viscosidade com o cisalhamento é reversível (normalmente sendo necessário algum intervalo de tempo) e os líquidos recuperam sua viscosidade original quando o cisalhamento é encerrado: moléculas longas voltam ao seu estado de orientação ao acaso e de conformação não estirada e as partículas deformadas voltam ao seu formato original e à sua distribuição randômica.

Referido tipo de comportamento é desejável em um grande número de processos, onde a viscosidade em escoamento deve ser menor que a viscosidade em repouso, possibilitando maior facilidade no manuseio e armazenagem dos fluidos. Alguns exemplos de situações em que estas características são desejáveis: aplicação de pro-

duto farmacêuticos por seringas ou capilares, pintura com tintas na forma de sprays ou por pincéis, envasamento de cosméticos e alimentos pastosos em tubos ou frascos e para uma maior eficiência nos processos de mistura em geral.

### 3.1.3 Modelos reológicos

Conforme apresentado na seção anterior, devido às várias formas constitutivas dos fluidos reofluidificantes, e de seus comportamentos intramoleculares quando submetidos ao escoamento, existem diferenças também na forma como a viscosidade aparente varia conforme a taxa de deformação aplicada em cada fluido.

Devido a estas diferenças de comportamento, surgiram várias modelos que visam descrever as variações experimentadas pelo fluido através de equações matemáticas de menor ou maior complexidade. A seguir serão apresentados alguns dos modelos reológicos mais utilizados, bem como suas curvas características.

#### Modelo Lei de Potência

Para uma grande variedade de fluidos não newtonianos a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação pode ser frequentemente representada como uma linha reta, quando plotado em um gráfico em coordenadas logarítmicas. Para esta parte da curva, pode-se aplicar a seguinte relação:

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \quad (3.2)$$

Assim, a relação para a viscosidade do fluido Lei de Potência pode ser expressa por:

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = k(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (3.3)$$

onde  $k$  e  $n$  são dois parâmetros empíricos de ajuste de curva, sendo  $k$  o índice de consistência e  $n$  o índice de comportamento.

Para um fluido reofluidificante, o valor de  $n$  varia entre 0 e 1, sendo que quando  $n = 1$  temos a definição de fluido newtoniano ( $\mu = \text{constante}$ ). Apesar de este modelo representar de forma simples o comportamento do fluido, ele tem sua aplicação restrita a uma faixa limitada de cisalhamento, de modo que os valores dos parâmetros empíricos dependem da faixa considerada. Este modelo, também conhecido como Modelo Ostwald de Waele, é o modelo mais empregado para a caracterização de fluidos não newtonianos.

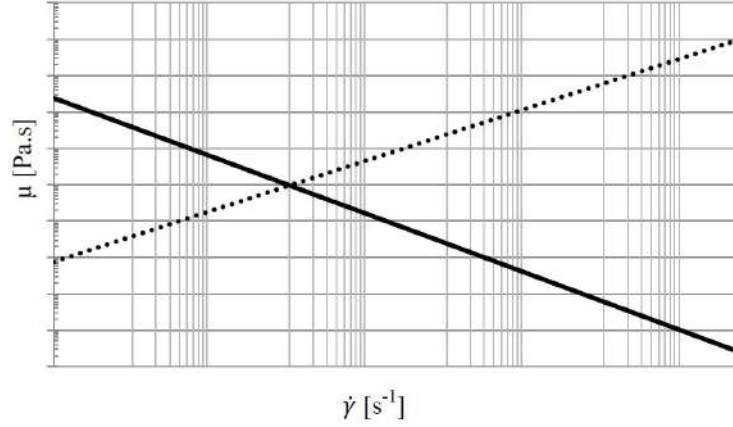


Figura 3.3: Representação do modelo Lei de Potência.

### Modelo de Cross

O modelo reológico de Cross representado pela Equação 3.4, pode ser reduzido à Lei de Potência quando  $\mu_\infty \ll \mu \ll \mu_0$  e pode ser representado pela seguinte equação:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = \frac{1}{[1 + [\lambda(\dot{\gamma})]^m]} \quad (3.4)$$

onde  $m$  é um parâmetro adimensional e  $\lambda$  denota uma constante de tempo. A Figura 3.4 representa graficamente o comportamento da viscosidade previsto pelo modelo de Cross.

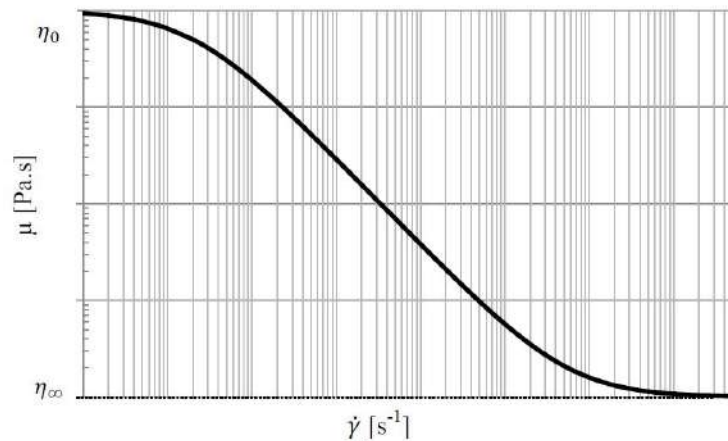


Figura 3.4: Representação do Modelo de Cross.

### Modelo de Carreau-Yasuda

O modelo reológico de Carreau-Yasuda é uma generalização do modelo não newtoniano descrito pela equação 3.2, descrevendo com maior precisão a variação da viscosidade com a tensão de cisalhamento que o modelo Lei de Potência. Neste modelo a viscosidade passa a ser descrita com a seguinte equação:

$$\frac{\mu - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (3.5)$$

onde  $\mu_0$  é a viscosidade do primeiro patamar Newtoniano,  $\mu_\infty$  é a viscosidade do segundo patamar Newtoniano,  $\lambda$  denota a constante de tempo,  $n$  o índice de comportamento e  $a$  é um parâmetro adimensional referente a zona de transição entre o primeiro patamar Newtoniano e a zona de Lei de Potência. Como pode ser observado, este modelo utiliza-se de cinco parâmetros ( $\mu_\infty, \mu_0, \lambda, n, a$ ) para descrever a reologia do fluido, enquanto o modelo Lei de Potência usa apenas dois ( $k, n$ ), permitindo melhor caracterização do comportamento, principalmente nas regiões de transição.

Na Figura 3.5 está representada a curva de variação de viscosidade versus taxa de deformação do modelo em questão, e os seus respectivos patamares.

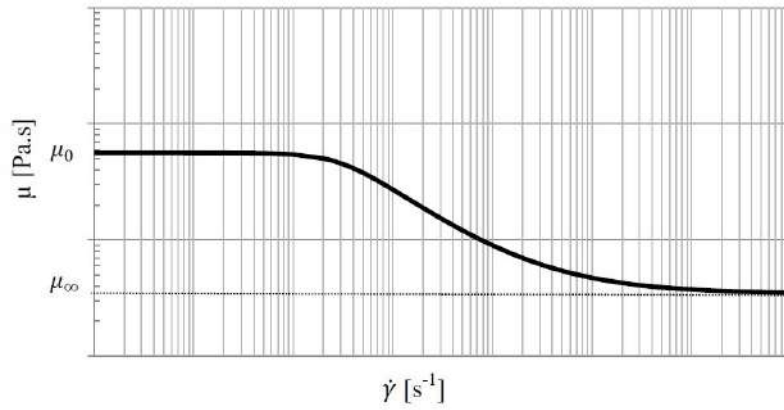


Figura 3.5: Representação do Modelo Carreau-Yasuda.

### Modelo de Herschel-Bulkley

O modelo de Herschel-Bulkley pode ser descrito como uma combinação dos modelos Lei de Potência e de fluido do tipo plástico de Bingham. Referido modelo é usado para fluidos que necessitam da aplicação de uma tensão de cisalhamento inicial ( $\tau_0$ ) para começar a escoar, apresentando a partir deste momento características reofluidificantes. Este comportamento é encontrado em alguns tipos de fluidos de perfuração na indústria do petróleo.

$$\tau = \tau_0 + k(\dot{\gamma})^n \quad (3.6)$$

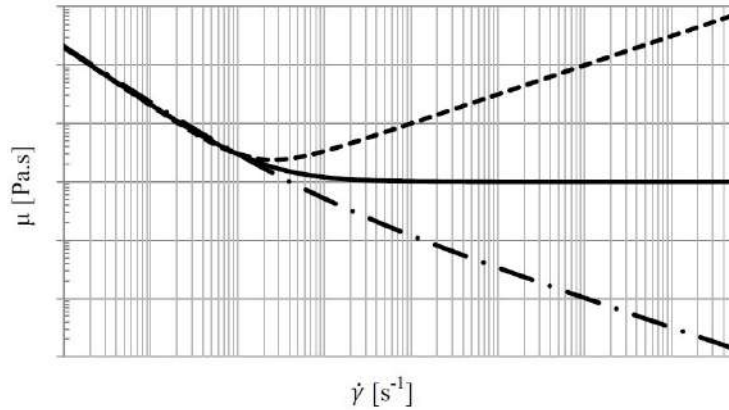


Figura 3.6: Representação do Modelo de Herschel-Bulkley.

### 3.1.4 Polímeros

A elaboração dos fluidos utilizados neste trabalho tem por base a dissolução de polímeros em água, gerando fluidos com características reofluidificantes. Os polímeros são macromoléculas formadas a partir de unidades estruturais menores, os monômeros. Esta associação em moléculas de longas cadeias e elevado peso molecular faz com que as mesmas se emaranhem e desemaranhem, formando laços ou nós temporários em um processo dinâmico. A intensidade e a duração dos emaranhados determinará o tempo de relaxação do material após a aplicação de uma tensão ou deformação, já que as macromoléculas sempre tentarão voltar ao seu estado de equilíbrio, adquirindo conformação de cadeias aleatórias. Dois dos polímeros que apresentam o comportamento desejado são Carboximetilcelulose e Goma de Xantana.

#### Carboximetilcelulose (CMC)

No Brasil, o CMC vem sendo utilizado desde a década de 70 na composição dos fluidos de perfuração, apresentando excelentes resultados de produtividade na construção dos poços de petróleo. O seu uso reduz as perdas por filtração e produz rebocos muito finos e capazes de impedir o escoamento do fluido através das formações geológicas perfuradas.

O CMC é um polímero natural derivado da celulose e insolúvel em água. Para tornar-se solúvel é modificado para a forma de polieletrólito. Esta modificação envolve uma alteração da unidade de repetição do polímero pela introdução do grupo carboximetil aniônico ( $CH_2OCH_2COO - Na^+$ ). O CMC é então obtido através da reação entre a celulose, o hidróxido de sódio ( $NaOH$ ) e o ácido monocloroacético ( $ClCH_2COOH$ ).

As propriedades físico-químicas do CMC dependem do grau de substituição (DS), grau de polimerização (DP), uniformidade da substituição e pureza do produto. O

DP é definido como o número médio de unidades monoméricas ao longo da cadeia polimérica; quanto maior DP, maiores o peso molecular e a viscosidade do polímero.

O DS é definido como o número médio de grupos carboximetílicos substituídos por unidade monomérica. Seu valor pode atingir um máximo de 3, mas na prática, são atingidos valores máximos entre 1,2 e 1,4. A solubilidade do CMC é função direta do DS; para DS maiores que 0,45 os CMCs são considerados solúveis em água. Os CMCs comerciais apresentam DS entre 0,7 e 0,8. Os produtos que possuem grau de substituição relativamente elevada nos grupos de repetição são chamados de PAC (celulose polianiônica).

### **Goma de Xantana**

A goma de xantana é um polissacarídeo sintetizado por uma bactéria fitopatogênica do gênero *Xanthomonas*. Este produto é completamente solúvel em água e oferece elevada viscosidade em concentrações baixas da goma. Também é compatível e estável em soluções que contêm altas concentrações de sal, além de ser solúvel e estável em condições ácidas e alcalinas.

A goma de xantana é um produto espessante, estabilizante e emulsificante, com capacidade de recuperar inteiramente a viscosidade após agitação. É um insumo que hidrata rapidamente na maioria dos sistemas à base de água, e sua solução é feita dispersando-a em água com suficiente agitação para fornecer uma separação física das partículas. Se a dispersão for um problema, a goma de xantana pode ser pré-dispersa em algum solvente miscível com água como, o glicol, álcool ou óleos vegetais, para ser então adicionado na fase aquosa.

O material fornece ainda excelente suspensão para sólidos insolúveis e gotas de óleo e estabilidade no congelamento e descongelamento. Exibe também baixa viscosidade no processamento, permitindo o seu bombeamento. Pode ser utilizado na indústria alimentícia em molhos, sobremesas instantâneas e congeladas, preparação com frutas e em misturas em pó para produtos de panificação além da sua utilização em bebidas.

Um dos inconvenientes para a aplicação nas condições de experimentação do presente estudo reside no fato de sua solução aquosa apresentar aspecto opaco, dificultando a aquisição de imagens do escoamento multifásico, motivo pelo qual a mesma foi descartada na realização deste trabalho, optando-se pelo uso exclusivo do CMC.

## 3.2 Padrões de escoamentos

A combinação de fases em um escoamento depende da interação interfacial entre os componentes presentes. São vários os fatores que influenciam nesta interação, tais como as vazões de cada fase (gás e líquido), orientação do escoamento (horizontal, inclinado ou vertical), geometria da tubulação, pressão, temperatura, entre outros. Dependendo da condição estabelecida, podem ser encontrados alguns padrões distintos de escoamento mostrados na Figura 3.7, conforme descrito por WEISMAN (1983):

**-Escoamento em bolhas (Bubble Flow)**, caracterizado pela presença de bolhas de gás dispersas na fase líquida. Devido à alta fluibilidade do gás, a concentração de bolhas é predominante na parte superior do escoamento. Este padrão é característico de escoamentos com alta vazão mássica.

**-Escoamento em Bolhas Dispersas (Disperse Flow)**, ocorre quando as forças de cisalhamento têm característica dominante no escoamento, normalmente devido à alta vazão de líquido. Nesta condição, pequenas bolhas escoam por toda a seção transversal, dispersas no líquido.

**-Escoamento estratificado (Stratified Flow)**, ocorre quando as velocidades de ambas as fases são baixas, de modo que a fase líquida se mantém na região inferior e a fase gasosa na região superior.

**-Escoamento Estratificado Ondulado (Wavy Flow)**, quando a velocidade do gás é superior à do líquido, o cisalhamento na interface causa perturbações na superfície do líquido, gerando ondulações, porém sem que o mesmo alcance a parte superior da tubulação.

**-Escoamento Pistonado (Plug Flow)**, ou escoamento de bolhas alongadas, ocorre quando a vazão de gás é aumentada ainda mais em relação ao escoamento estratificado ondulado, fazendo com que as perturbações da superfície atinjam a parte superior da tubulação. Este padrão é caracterizado pela presença de pistões de líquido separados por bolhas longas, de diâmetro inferior ao da tubulação, de modo que a fase líquida é contínua na parte inferior da mesma.

**-Escoamento Pistonado Severo (Slug Flow)**, é caracterizado por apresentar alta razão gás/líquido, gerando bolhas alongadas de diâmetro semelhante ao da tubulação. Neste padrão os pistões de líquido apresentam alta concentração de pequenas bolhas de gás dispersas no meio.

**-Escoamento Anular (Annular Flow)**, ocorre na presença de elevadas vazões de gás, fazendo com que o líquido, em menor concentração, molhe a parede da tubulação, formando uma película anelar de líquido na mesma. Devido à grande velocidade do gás, a superfície do líquido é perturbada de forma semelhante ao escoamento estratificado ondulado, gerando ondas de pequena amplitude. É possível



observar a presença de gotículas de líquido dispersas no fluxo central de gás.

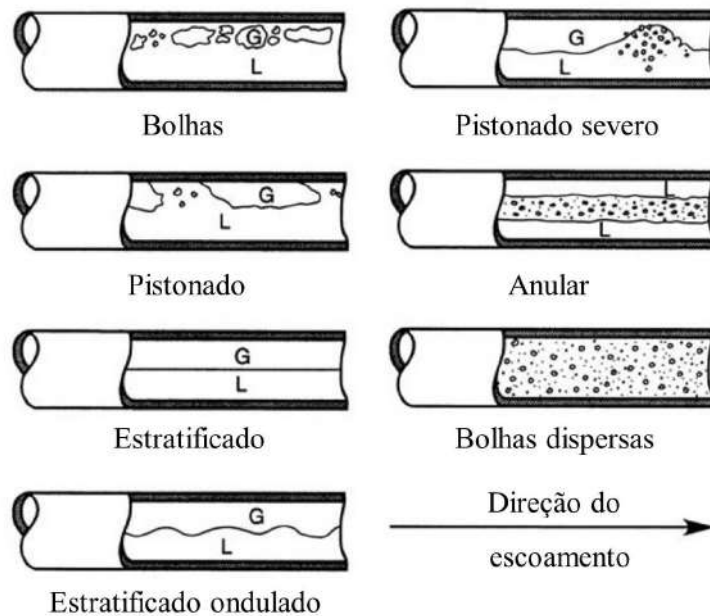


Figura 3.7: padrões de escoamento para mistura ar/água em tubulação horizontal de diâmetro 5,1mm. Adaptado de WEISMAN (1983)

### 3.2.1 Mapas de padrões de escoamento

Conforme descrito anteriormente, dependendo das suas características, o escoamento bifásico ocorre em um determinado padrão. Por este motivo, inúmeros trabalhos na literatura visam caracterizar esta dependência dos padrões de escoamento com sua velocidade superficial (definida como a razão entre vazão e área transversal da tubulação), fração de volume e suas propriedades físicas, expressando tais padrões na forma de um mapa.

No limite entre cada região do mapa, devido à variação das velocidades superficiais, existe uma região de transição, onde aumentam as perturbações (no caso do aumento de velocidade) causadas pela interação do escoamento das fases até atingir o limite para alteração no padrão de escoamento.

Vários autores apresentaram mapas de escoamento para as mais diversas situações, como MANDHANE (1974) e WEISMAN (1979), onde as velocidades superficiais do líquido e do gás são apresentadas nos eixos do gráfico. A principal restrição deste tipo de caracterização reside no fato de que estes mapas são apresentados normalmente na forma dimensional, sendo assim aplicáveis apenas ao diâmetro de tubulação e fluidos utilizados em sua confecção.

Porém, segundo CHHABRA (2008) apesar das pequenas diferenças encontradas para diferentes fluidos e diâmetros de tubulação, um mapa geral de escoamento pode

ser estabelecido. Analisando uma grande quantidade de dados gerados por vários autores, foi proposto o mapa mostrado na Figura 3.8 . Este mapa geral considera escoamentos nas seguintes condições:  $0,021 \leq V_{SL} \leq 6,1m/s$ ;  $0,01 \leq V_{SG} \leq 55m/s$ ;  $6,35 \leq D \leq 207mm$  e  $0,1 \leq n \leq 1,0$ . Com uma representatividade de 70% dos padrões de escoamento previstos.

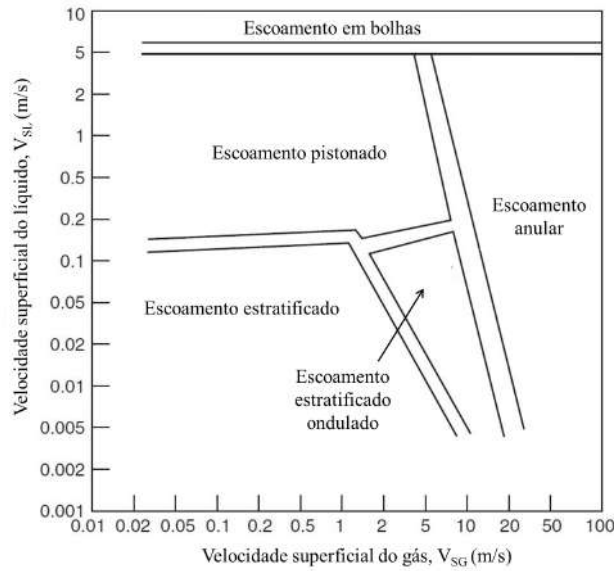


Figura 3.8: mapa de padrões em escoamento horizontal. Adaptado de CHHABRA (2008)

### 3.2.2 Modelo de célula unitária

Nos modelos de célula unitária, como o de DUKLER (1975), a natureza conturbada do escoamento pistonado é tratada como uma repetição periódica de uma mesma estrutura. Esta unidade, chamada de célula unitária, normalmente é dividida em duas regiões: o pistão líquido e a bolha, ou região de filme líquido. A Figura 3.9 mostra as regiões da bolha conforme o modelo de DUKLER (1975).

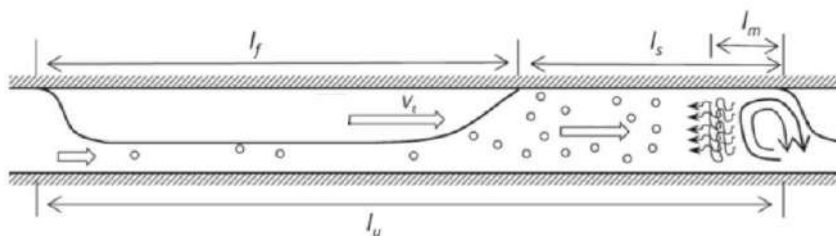


Figura 3.9: Modelo de célula unitária. Adaptado de BANDEIRA (2016)

Conforme observado na figura, a célula unitária é dividida em duas regiões distintas: o pistão líquido de comprimento  $l_s$ , e o filme líquido de comprimento  $l_f$ , que contém a bolha alongada. O comprimento total da célula unitária, representado por

$l_u$ , é a soma das parcelas  $l_s$  e  $l_f$ . Adicionalmente, define-se  $l_m$  como o comprimento de mistura (região onde o pistão absorve líquido do filme, provocando aumento de velocidade) e  $V_t$  como a velocidade de translação da bolha.

Este tipo de modelo é baseado no balanço de massa e momento na célula unitária, e depende da utilização de correlações empíricas para fechamento. Algumas das variáveis usualmente presentes são a frequência de passagem de bolhas ( $\nu_t$ ), a fração de líquido no pistão (*holdup*) e a velocidade de translação ( $V_t$ ).

Neste trabalho foram utilizados os modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005), que utilizam os mesmos princípios básicos nas suas formulações, diferindo principalmente nas simplificações efetuadas no problema e a escolha das condições de fechamento. Uma descrição detalhada das diferenças dos dois modelos foi apresentada por BANDEIRA (2016). As correlações de ANDREUSSI (1993) para fração de líquido no pistão e SCHULKES (2011) para frequência foram utilizadas como condições de fechamento.

Vários trabalhos recentes, como os de XU (2009), JIA (2011) e PICCHI (2015), consideraram a modelagem de célula unitária assumindo que o fator de atrito pode ser considerado utilizando-se a seguinte expressão:

$$f_L = C_L Re_{MR}^{-m} \quad (3.7)$$

onde, de acordo com ORELL (2005),  $C_L = 16$  e  $m = 1$  para escoamento laminar e  $C_L = 0,046$  e  $m = 0,25$  para escoamento turbulento.

O Número de Reynolds generalizado de METZNER (1955) é dado por:

$$Re_{MR} = \frac{8\rho D^n V_L^{2-n}}{k(6 + \frac{2}{n})} \quad (3.8)$$

onde  $D$  é o diâmetro do duto e  $V_L$  é a velocidade da fase líquida.

A partir da Equação 3.8 pode-se obter uma relação para a viscosidade efetiva como:

$$\mu_{eff} = \frac{k(6 + \frac{2}{n})^n D^{1-n} V_L^{n-1}}{8\rho} \quad (3.9)$$

Nas análises apresentadas neste trabalho serão incorporados os efeitos da reologia do fluido em  $f_L$  através da equação desenvolvida por ANBARLOOEI (2015). A Equação 3.10 é válida para o escoamento de fluidos Lei de Potência. A mesma foi derivada a partir de fenomenologia de Kolmogorov e análise dimensional.

$$f_L = (0,102 - 0,033n + 0,01/n) Re_{MR}^{-1/(2(n+1))} \quad (3.10)$$

As Equações 3.7 e 3.10 foram usadas para o fator de atrito da fase líquida no filme e pistão líquido, juntamente com Equação 3.9, em substituição à viscosidade do líquido.

Os resultados das modificações dos modelos serão comparados aos dados experimentais obtidos na elaboração deste trabalho no Capítulo 5.

# Capítulo 4

## Método Experimental

O trabalho experimental para caracterização de escoamentos bifásicos de fluidos reofluidificantes baseia-se na medição de propriedades dos mesmos sob condições controladas previamente estabelecidas. Para tanto, uma bancada experimental foi preparada e instrumentada de modo a permitir a obtenção dos parâmetros de maior importância presentes no fenômeno.

Os experimentos foram conduzidos nas dependências do Laboratório de Escoamentos Multifásicos do Núcleo Interdisciplinar de Dinâmica dos Fluidos da UFRJ.

### 4.1 Aparato Experimental

A seguir, serão apresentadas as características do sistema construído e o método experimental desenvolvido para obtenção de dados. Um desenho esquemático do sistema é mostrado na Figura 4.1.

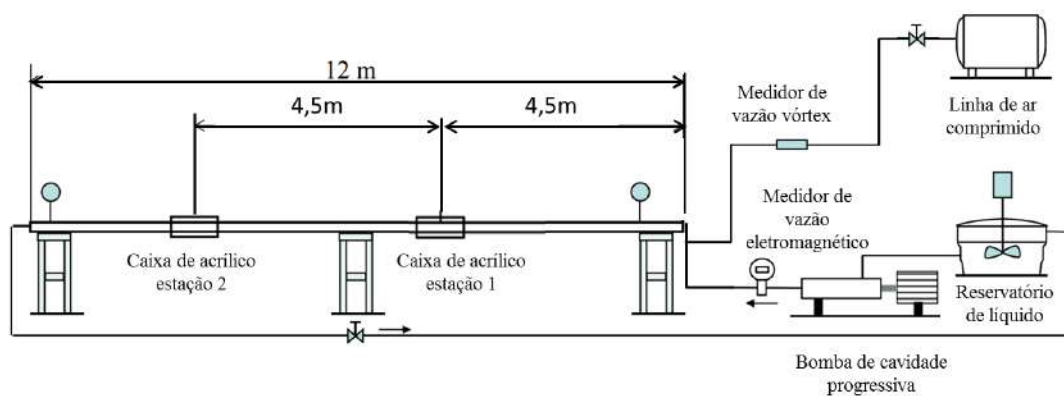


Figura 4.1: Diagrama esquemático do circuito de testes.

Este sistema é constituído por uma tubulação horizontal de acrílico transparente com 44,2 mm de diâmetro interno e 12 m de comprimento (Figura 4.2 (b)). A tubulação faz parte de um sistema fechado, alimentado por um reservatório graduado,

construído em aço inoxidável, com capacidade para  $1\text{ m}^3$ , onde fica armazenado o fluido a ser testado (Figura 4.2 (a)). Este reservatório dispõe de um sistema de agitação automatizado, movido por motor elétrico, que permite que o fluido de teste seja misturado diretamente no tanque do sistema, através da mistura de água purificada e a substância necessária para conferir as propriedades características do fluido reofluidificante, conforme apresentado no capítulo anterior. Para circulação do fluido é utilizada uma bomba volumétrica de  $9,2\text{ kW}$  de potência, controlada por um inversor de frequência (Figura 4.2 (c)). A vazão de líquido é determinada por um medidor de vazão eletromagnético Promag 10P40, com incerteza máxima de 0,5% (Figura 4.4 (a)).



Figura 4.2: Circuito de testes.

Um compressor marca SCHULZ, Modelo SRP 3015 Compact, de 15 Hp de Potência e 200 litros de capacidade é utilizado para fornecer ar comprimido para o escoamento bifásico. O ar passa por um secador SCHULZ SRS 60, deixando-o com umidade relativa inferior a 1%, o que evita a condensação de umidade no sistema de medição. Para determinar a vazão de ar utiliza-se um medidor de vazão por vórtex, modelo FLP04-G2NA, do fabricante Techmeter, previamente calibrado, com medição simultânea de temperatura do ar de injeção (Figura 4.4 (b)). A vazão medida é corrigida às condições do escoamento, utilizando-se a temperatura do fluido e a pressão medida na linha de testes, a  $1,5\text{ m}$  da entrada, utilizando um medidor de pressão absoluta ROSEMOUNT 800 PSI.

A Figura 4.3 mostra um esquema do trecho inicial da bancada, onde ocorre a injeção de gás. A tubulação entre o reservatório e o início do trecho horizontal é

constituída de tubos de aço inox com diâmetro interno de  $44,5\text{ mm}$ , terminando em uma junta tipo "T", com uma extremidade isolada por uma válvula de bloqueio. A injeção de gás é feita no trecho vertical, perpendicular a este, a  $300\text{ mm}$  da junta "T". A linha de injeção possui diâmetro interno de  $1/8$  de polegada.

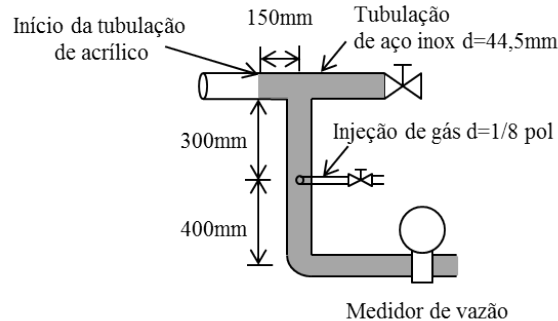


Figura 4.3: Diagrama esquemático do ponto de injeção de gás.

A medição da temperatura do gás e do líquido é realizada utilizando um termômetro modelo KT300, do fabricante Siberius. A medição é realizada para cada condição de teste, antes do início da aquisição de dados, ajustando-se a vazão de gás para a condição desejada.

A separação das fases líquida e gasosa, após a circulação do sistema, ocorre no próprio tanque de armazenamento de líquido, por meio gravitacional, onde uma abertura na parte superior do tanque permite que o gás seja expulso do mesmo.

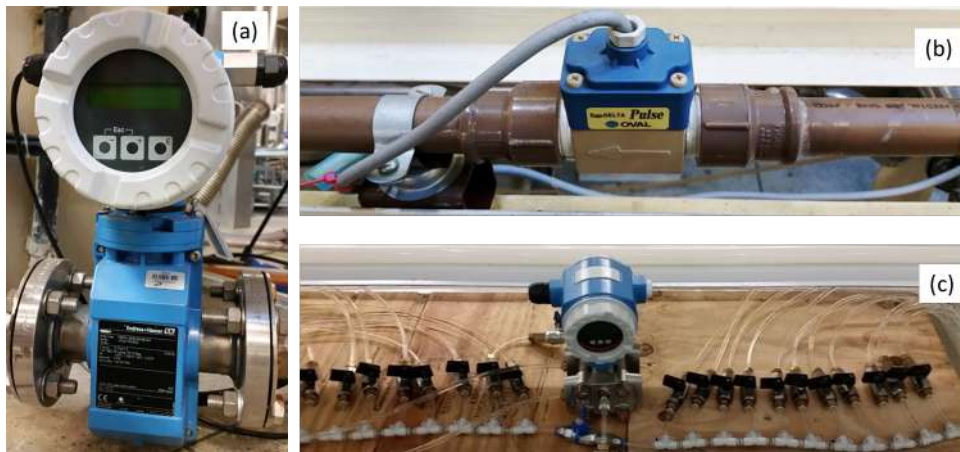


Figura 4.4: (a) Medidor de vazão eletromagnético (líquido), (b) Medidor de vazão por vortex( gás) e (c) Medidor de pressão diferencial.

Para avaliar a queda de pressão ao longo da tubulação foram instaladas 20 tomadas de pressão, distantes  $0,5\text{ m}$  entre si, com exceção do ponto de observação das bolhas, onde o espaçamento é de  $1\text{ m}$ , totalizando  $10\text{ m}$  de tubulação instrumentada. As tomadas de pressão são posicionadas a partir de  $1,5\text{ m}$  da entrada dos fluidos.



Um medidor de pressão diferencial Endress Hauser Deltabar M (Figura 4.4 (c)), com faixa de medição de 0 a 500 *mbar* permite a avaliação da perda de carga.

Para determinação das características das bolhas no escoamento foi instalada uma caixa de acrílico posicionada a 9 *m* do início da tubulação. Esta caixa, preenchida com água destilada, permite que sejam obtidas imagens das bolhas sem que ocorra difração devido ao perfil cilíndrico do duto. A aquisição de imagens é realizada com uma câmera de alta velocidade NanoSense Mk III, da fabricante DANTEK, com uma capacidade de captura de 2080 quadros por segundo e definição de 1280x1024 pixels. Utilizou-se uma lente AF D Micro-Nikkor 60*mm**f*/2.8*D*, com abertura do diafragma em *f*/4. A câmera é posicionada na lateral da caixa de acrílico a uma distância de 50 *cm*. Para geração de contraste nas bolhas, foram utilizadas duas fontes de luz Motion LED, sincronizadas com a câmera para que a emissão de luz ocorresse no instante da captura das imagens. Todo o sistema de aquisição de imagens é controlado por um computador, utilizando o software Dynamic Studio 2015*a*® versão 4.15.115.0, da empresa Dantec Dynamics, para tratamento e processamento. A Figura 4.5 apresenta a câmera posicionada em frente à caixa de acrílico, com as fontes de luz colocadas ao fundo.



Figura 4.5: Câmera de alta velocidade posicionada em frente à caixa de acrílico.

Uma segunda caixa de acrílico foi posicionada a 4,5 metros da entrada da tubulação, utilizando-se outra câmera de aquisição de imagens igual à descrita acima, e controlada pelo mesmo sistema. A utilização desta segunda câmera tem o intuito de caracterizar o desenvolvimento do escoamento e possíveis alterações nas características das bolhas ao longo da tubulação.

Para realizar a caracterização do campo de velocidades no escoamento foi utilizado um sistema de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV, na sigla em inglês). Neste ensaio, micro partículas de rodamina são adicionadas ao fluido e iluminadas por uma alta intensidade de luz através de um laser. A fonte emissora, modelo



Quantel Big Sky Laser, foi posicionado abaixo da caixa de acrílico, emitindo o laser verticalmente. A distância entre o laser e a caixa é de 48 *cm*. Para aquisição das imagens utilizou-se a mesma câmera descrita acima, porém, para que fosse possível observar as partículas de rodamina no fluido, com um filtro posicionado em frente à lente e em frente aos LEDs, permitindo que apenas o comprimento de onda desejado chegasse até o sensor da câmera. Uma descrição detalhada deste teste será apresentada na seção Velocimetria por imagem de partículas.

#### 4.1.1 Preparação dos fluidos

Antes de iniciar os testes de escoamento de fluidos reofluidificantes na bancada, foi realizada a avaliação de algumas amostras preparadas em laboratório, utilizando os polímeros apresentados no capítulo anterior. Estas amostras foram preparadas utilizando água desmineralizada, à qual são adicionados os polímeros em diferentes concentrações, de modo a gerar fluidos com características distintas. Para determinar corretamente o percentual de polímero em cada amostra, foi utilizada uma balança de precisão com sensibilidade de 1 miligrama. Cada amostra preparada contém 50 *ml* de fluido, permitindo a realização de inúmeros testes com cada composição, visto que o volume utilizado no reômetro em cada teste é de 1 *ml*.

Devido à estrutura complexa dos polímeros, o procedimento de mistura envolve algumas etapas: inicialmente, o pó de polímero é diluído em água e submetido a agitação mecânica por um período de 90 minutos, utilizando um agitador de hélices para becker. Terminada a fase inicial de diluição, o fluido é deixado em repouso por 24 horas, onde ocorre a hidratação e separação de cadeias complexas do mesmo. Após este período de repouso, o fluido é novamente submetido a agitação por 30 minutos para homogeneização e dissolução de eventuais cristais que tenham se formado nas paredes do recipiente. Terminado este processo o fluido está pronto para ser testado. Como o polímero utilizado é de natureza orgânica, adiciona-se ao fluido uma concentração de 0,03% em massa de Formoldeído, que atua como biocida, evitando a degradação bacteriológica do composto.

No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados fluidos reofluidificantes a base de água, preparados a partir da diluição de Carboximetilcelulose (CMC). As concentrações de CMC utilizadas foram de 0,05%, 0,1% e 0,2%. Para os testes na bancada, a preparação das misturas seguiu o procedimento apresentado acima, porém, como a velocidade de agitação do tanque experimental é inferior àquela utilizada na preparação das amostras, optou-se por realizar uma pré-diluição em um agitador externo, em concentração de 2%, para depois diluir o fluido completamente no tanque misturador. Desta forma, pode-se evitar que o pó de CMC fique aderido à parede do tanque, garantindo assim a concentração desejada.



Figura 4.6: Início da pré-diluição do CMC em água, utilizando o agitador de bancada.

Nesta etapa de pré-diluição, utilizou-se um reservatório de 50 litros para a preparação da mistura. Utilizou-se como agitador uma furadeira de bancada, onde foi instalada uma hélice fabricada no laboratório, com rotação variando entre 0 e 200 rpm (Figura 4.6). O polímero diluído foi agitado por uma hora, permitindo a completa diluição do CMC na água. Após a diluição, este volume é transferido para o reservatório graduado, onde se adiciona a quantidade de água necessária para atingir a concentração pretendida e o biocida. O agitador do reservatório é então acionado por mais uma hora para homogeneizar a mistura e finalizar a diluição. Após esta agitação o fluido permanece em repouso por 24 horas para hidratação. Uma nova agitação é realizada para homogeneização, finalizando o processo de preparação do fluido. Uma amostra do fluido é então retirada para realizar a caracterização reológica. Outras amostras são retiradas durante e após os testes para verificar a possível degradação do mesmo.

#### 4.1.2 Caracterização dos fluidos

A avaliação das características reológicas dos fluidos utilizados nos experimentos foi realizada utilizando-se um reômetro rotacional HAAKE MARS III, fabricado pela Thermo Cientific, com banho termostático e sistema de controle de temperatura que permite variar a temperatura da amostra entre 4 e 120°C, mantendo a mesma com variação máxima de 0,2°C. Foi utilizada uma geometria do tipo placa e cone, com ângulo de 1° e 30 mm de raio, que permite quantificar viscosidade entre 0,001 e 500 mPas, com uma taxa de cisalhamento de até 10000 s<sup>-1</sup>. Neste ensaio, 1 ml de fluido é colocado entre a placa e o cone (Figura 4.7), que ficam afastados por uma distância de 0,052 mm, sendo o cone posto em rotação controlada. O movimento do cone implica em um torque necessário para manter a velocidade do mesmo. Em cada ensaio efetua-se a medição de uma série de 40 relações torque

*versus* velocidade angular, com  $\dot{\gamma}$  variando em progressão logarítmica entre 10 e 7500 (1/s). Cada condição é mantida durante 50 segundos. O teste é repetido três vezes para cada fluido, obtendo-se uma média dos resultados.

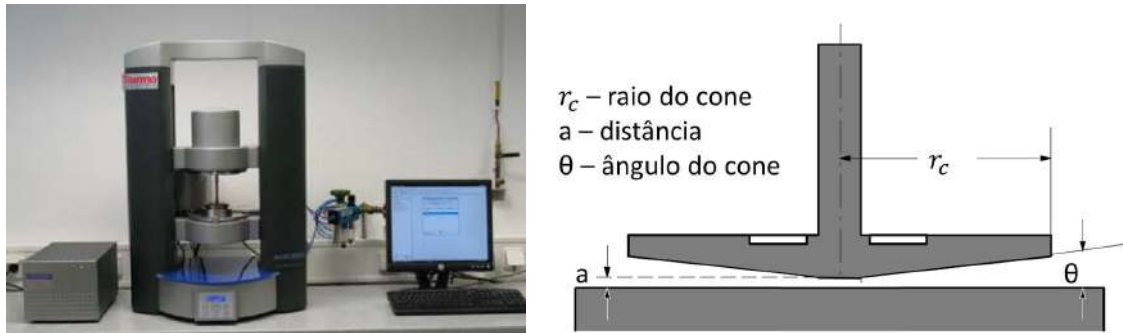


Figura 4.7: (a) Reômetro utilizado para caracterização dos fluidos, (b) detalhe geométrico do cone e placa utilizados.

A tensão de cisalhamento é obtida pela equação 4.1, sendo  $M$  o torque necessário para manter a velocidade angular ( $N.m$ ) e  $r_c$  o raio do par placa/cone ( $m$ ). A taxa de cisalhamento é definida pela equação 4.2, sendo  $\Omega$  a velocidade angular ( $s^{-1}$ ) e  $\theta$  o ângulo do cone.

$$\tau = \frac{3M}{2\pi r_c^3} \quad (4.1)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\Omega}{\tan\theta} \quad (4.2)$$

Os testes de caracterização reológica podem ser efetuados sob uma grande variedade de aspectos, a depender de quais informações são desejadas. Além do levantamento das curvas de tensão cisalhante versus taxa de cisalhamento e viscosidade *versus* taxa de cisalhamento, é possível efetuar o levantamento de informações como a variação da viscosidade com temperatura e/ou pressão, efeitos do tempo de cisalhamento sobre a viscosidade ou obtenção da taxa de cisalhamento máxima que o fluido suporta sem sofrer degradação. Porém, considerando que no presente estudo não serão utilizadas condições extremas e que o sistema não estará sujeito a variações de temperatura e pressão, estas caracterizações adicionais não serão realizadas.

A partir deste teste de propriedades, é então realizada uma comparação entre os modelos reológicos descritos no capítulo anterior, de modo a determinar qual modelo melhor descreve o comportamento de cada fluido não newtoniano preparado, permitindo assim gerar a equação característica que poderá ser empregada para modelar o comportamento do fluido.

### 4.1.3 Dimensionamento por Sombras (Shadow Sizer)

O Dimensionamento por Sombras é uma técnica de medição ótica que permite obter informações como tamanho e formato das bolhas presentes no escoamento, por intermédio de uma câmera de alta velocidade e resolução, e de uma fonte de luz difusa. As bolhas de ar que escoam pela tubulação são iluminadas em um anteparo posicionado em uma das faces da caixa de visualização, feita de acrílico, e as sombras geradas pela passagem das mesmas são registradas no lado oposto pela câmera de alta velocidade, em uma frequência ajustada para que as bolhas, independente de seu tamanho, possam ser observadas em sua totalidade, por meio de uma sequência de imagens. Através da análise e processamento destas imagens, é possível caracterizar o comportamento dos fluidos sob as mais variadas condições, permitindo determinar os padrões de escoamento e quantificar dados relevantes como o formato das bolhas ou a quantidade e volume de bolhas dispersas no pistão líquido.

Com uma frequência de captura previamente estabelecida, é possível determinar a velocidade de deslocamento e a deformação das bolhas comparando dois quadros sucessivos obtidos pela câmera. O levantamento das propriedades geométricas das bolhas pode ser efetuado a partir de um algoritmo que processa as imagens e que permite delinear o contorno de cada interface a partir do contraste presente nas suas extremidades. Desta forma, vários outros fatores relevantes do escoamento podem ser obtidos, tais como:

- comprimento da bolha;
- comprimento do pistão líquido;
- orientação;
- velocidade de translação;
- posição;
- frequência de passagem;

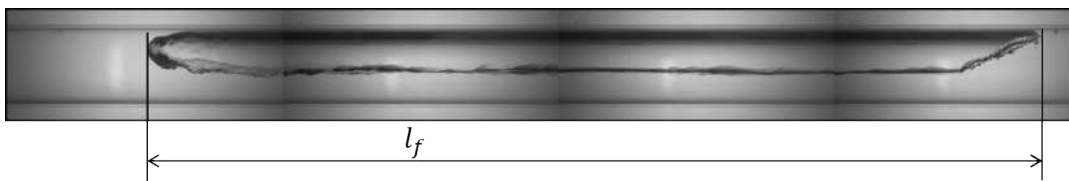


Figura 4.8: Comprimento de bolha obtido com dimensionamento por sombras.

A Figura 4.8 apresenta uma bolha obtida através da composição de imagens sucessivas. A partir desta imagem são determinadas as informações geométricas da bolha, como comprimento da bolha e do pistão líquido (distância do fim da cauda da bolha até o início da bolha sucessiva). A soma destas duas dimensões determina o comprimento unitário da bolha. Para cada condição são avaliadas 5000 imagens, obtendo-se assim as dimensões médias que serão apresentadas adiante.

## Processamento de imagens com dimensionamento por sombras

O processamento das imagens obtidas para dimensionamento por sombras foi realizado com o auxílio do software *Wolfram Mathematica*®. Para isso, foi gerado um código computacional para tratamento das imagens com objetivo de identificar as características geométricas das bolhas, em especial as de início e final da bolha. Com estas informações, é possível calcular a velocidade de translação e frequência de passagem das bolhas, e os comprimentos de bolha e pistão líquido para cada condição de escoamento. A metodologia de processamento utilizada foi baseada no trabalho de MATAMOROS (2014).

Antes de iniciar a aquisição das imagens do escoamento bifásico, faz-se a aquisição de uma série de 100 imagens escoando apenas líquido, para realizar a calibração dimensional, que é feita sobre a média destas imagens. Estabelece-se a dimensão interna da tubulação (44,2mm) como referência para o software, que calcula então as dimensões totais da imagem. Este procedimento é repetido sempre que se inicia um teste ou quando algum ajuste é realizado na câmera. Considerando a posição e ajustes utilizados na câmera, as imagens obtidas apresentam entre 220 e 225 *mm* de comprimento, por 44,2 *mm* de altura, considerando-se apenas a parte interna da tubulação como região de interesse.

Uma nova aquisição de 100 imagens é feita ainda escoando apenas líquido na tubulação. A média destas imagens será usada como imagem de fundo para o processamento. Utiliza-se uma imagem média para evitar que a presença de qualquer pequena bolha presente na tubulação atrapalhe o processamento.

A aquisição das imagens do escoamento é realizada conforme descrito na Descrição dos Testes. O tratamento ocorre em uma série de etapas que serão descritas brevemente a seguir. A identificação das bolhas é baseada na presença ou não de sombras. Desta forma, utiliza-se uma série de operações sobre a imagem de modo a intensificar os contrastes e contornos da bolha. As imagens do escoamento bifásico, adquiridas a 100 *Hz*, são então importadas para o software e convertidas em escala de cinza. O mesmo é feito com a imagem de fundo. A seguir, as imagens são subtraídas da imagem de fundo, restando apenas a imagem da bolha sobre um fundo preto. Faz-se um processo de eliminação dos elementos de pequenas dimensões, descartando as pequenas bolhas dispersas e mantendo apenas a bolha principal. A imagem tem suas cores invertidas, dando destaque à bolha. Em seguida, a mesma é binarizada, gerando uma matriz onde os pixels pretos (da bolha) tem valor de 0 e os brancos (do restante da imagem) tem valor de 1.

A determinação da presença de bolhas e a posição do nariz ou cauda da bolha em cada imagem são feitas com base na avaliação desta matriz. A detecção ocorre pela variação de intensidade (preto ou branco), e pelo sentido desta variação, ou

seja, passando de branco para preto representa o início de uma bolha, e de preto para branco, o seu fim. Utilizou-se como critério de diferenciação entre bolhas alongadas e bolhas dispersas o comprimento mínimo de 30 *mm*, portanto qualquer bolha com medida inferior a esta não foi considerada no processamento de dados, sendo entendida como volume de gás disperso no pistão líquido.

A velocidade de translação da bolha é calculada pelo deslocamento do nariz da bolha entre imagens sucessivas, dado que a dimensão da bolha e frequência de aquisição são dados de entrada da medição. A velocidade apresentada nos gráficos do capítulo de resultados refere-se a média das velocidades das bolhas.

O comprimento de bolha é obtido pela soma das distâncias deslocadas por ela nas imagens entre a detecção do nariz e da cauda. O comprimento do pistão líquido, da mesma forma, é a distância entre a cauda de uma bolha e nariz da bolha sucessiva.

A frequência média das bolhas é calculada como sendo o número de bolhas presentes dividido pelo tempo de aquisição dos dados.

Devido à quantidade de bolhas dispersas na esteira, em especial sob algumas condições nas maiores vazões de líquido e com os fluidos de maior concentração de CMC, o programa utilizado não foi capaz de determinar com precisão o final da cauda da bolha. Nestes casos, não foi possível determinar as dimensões das bolhas e pistão líquido automatizadamente. Portanto, para estes casos em específico, realizou-se o processamento de forma manual, ou seja, pela medição direta dos comprimentos nas imagens. O procedimento utilizado foi o mesmo presente no algoritmo de processamento.

Esta checagem manual também foi realizada em todos os casos analisados, porém apenas nas bolhas iniciais a título de conferência dos resultados apresentados pelo programa.

#### **4.1.4 Velocimetria por imagem de partículas (PIV)**

Visando entender e descrever corretamente os fenômenos envolvidos no escoamento de fluidos, foram desenvolvidas, ao longo do tempo, algumas metodologias de medição e visualização dos escoamentos. O tubo de Pitot foi uma das primeiras técnicas desenvolvidas com essa finalidade, permitindo a determinação pontual da velocidade no escoamento. Este, porém, tem a grande desvantagem de ser uma técnica bastante intrusiva, devido à necessidade da inserção de uma sonda no escoamento, fato que pode perturbá-lo, especialmente em seções de pequeno diâmetro, como as utilizadas neste experimento. Outra técnica mais moderna é a Anemometria de Fio Quente, que permite a aquisição de dados em taxas da ordem de centenas de *kHz*. Esta também é baseada na utilização de uma sonda que, apesar das dimensões diminutas quando comparadas ao Tubo de Pitot, continua sendo intrusiva.

A Velocimetria *Laser – Doppler*, em oposição às técnicas citadas anteriormente, permite a determinação da velocidade do escoamento sem a inserção de elementos que possam perturbar o escoamento, sendo necessário apenas uma janela de observação na tubulação do escoamento e que o fluido escoado seja transparente. A técnica é baseada na diferença de comprimento de onda da luz espalhada por uma partícula em movimento e o comprimento de onda da luz incidente. Dois feixes de laser são projetados no escoamento, sendo o ponto de interseção entre os mesmos, o volume de medição no interior do escoamento a ser estudado. Partículas traçadoras adicionadas ao fluido irão sensibilizar um fotodetector ao atravessarem este volume. Este sinal gerado é então processado para determinação de uma componente da velocidade. A utilização de um segundo laser de comprimento de onda distinto permite a obtenção da segunda componente de velocidade. A terceira componente pode ser obtida com a utilização de uma segunda fonte de laser com comprimento de onda distinto dos dois anteriores. As principais vantagens desta técnica, além de não ser intrusiva, são: a alta resolução espacial, dependendo diretamente do tamanho do volume de medição; a alta resolução temporal, relacionada ao tamanho e concentração das partículas e; a possibilidade de obter-se as três componentes de velocidade do escoamento. Porém, a mesma tem como desvantagem o fato de a medição ser realizada de forma pontual, sendo necessário o reposicionamento da sonda para cada ponto de avaliação no escoamento. Além disso, esta técnica tem sua aplicação restrita por algumas condições especiais, como por exemplo, a necessidade de que o fluido seja transparente, assim como a tubulação, ao menos na região de interesse. Além disso, deve-se ter o cuidado para evitar que o índice de refração da tubulação e do fluido causem distorções na luz emitida e na imagem gerada.

A Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV, das iniciais em inglês para *Particle Image Velocimetry*) permite que seja determinado o campo de velocidades em um plano que corta a região de interesse. Esta técnica, também não intrusiva, possui grande resolução espacial, porém tem sua taxa de aquisição ainda restrita devido à limitação técnica dos sistemas de iluminação e aquisição. A técnica, surgida na década de 1980, ainda hoje é limitada pela capacidade de armazenamento e processamento de imagem dos computadores, devido à alta resolução necessária nas imagens utilizadas.

O técnica é baseada na iluminação e registro de posição de partículas inseridas no escoamento. Os sistemas existentes comercialmente utilizam o princípio de quadro duplo para processamento de informações. Nesta configuração, a região a ser analisada é iluminada por um pulso plano de *laser* e a luz refletida pelas partículas traçadoras sensibiliza uma câmera que capta e armazena a imagem. Um segundo pulso é gerado após um curto intervalo de tempo, da ordem de microssegundos, gerando uma segunda imagem que é armazenada pela câmera. Após o fim das

aquisições, as imagens são transferidas para o computador para serem processadas.

A determinação dos campos de velocidade é realizada de forma estatística, utilizando um algoritmo denominado Correlação Cruzada, onde a imagem é dividida em pequenas áreas contendo cada uma entre 10 e 15 partículas e, assumindo que não há grandes gradientes de velocidades em cada uma destas áreas, pode-se determinar o deslocamento médio deste pequeno bloco de partículas, obtendo-se assim as velocidades desejadas.

A seguir será descrito o princípio de funcionamento da Velocimetria por Imagem de Partículas.

### **Princípio de funcionamento do PIV**

O sistema de Velocimetria por Imagem de Partículas é composto pelos seguintes elementos: partículas traçadoras, iluminação laser, câmera para a aquisição de imagens e um computador para o processamento das imagens e cálculo das velocidades do escoamento.

A Figura 4.9 ilustra o princípio de funcionamento da Técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas. As partículas traçadoras são misturadas de forma homogênea no escoamento líquido, assumindo-se que, devido a seu reduzido tamanho e massa específica semelhante à do fluido, as mesmas deslocam-se na mesma velocidade que este. A região de interesse, um plano paralelo ao sentido do escoamento e posicionado no centro da tubulação, no plano vertical, é iluminada por um feixe de luz de alta intensidade emitido por um laser. Para obter-se um feixe plano de luz utiliza-se um conjunto de lentes cilíndricas. As partículas, ao serem atingidas pelo laser, espalham a luz, de modo que podem ser identificadas pela câmera de alta velocidade sincronizada com a emissão do laser. A sequência é repetida com um pequeno intervalo de tempo previamente estabelecido, de modo a obter um par de imagens, com a posição das mesmas partículas em momentos diferentes.

Para que a identificação das partículas ocorra de forma precisa, as imagens são divididas em pequenas áreas chamadas janelas de interrogação. Nestas áreas, considera-se que as partículas deslocam-se de forma homogênea no intervalo entre as duas imagens, permitindo-se, através do padrão de dispersão das partículas, identificar duas posições sucessivas. Pode-se então calcular o deslocamento das partículas e suas velocidades. A partir deste campo de velocidades obtido para toda a imagem, pode-se calcular outras grandezas como campos médios e gradientes espaciais.

### **Partículas traçadoras**

Conforme descrito anteriormente, para que seja possível a aplicação do PIV, o fluido deve ser transparente ao comprimento de onda da iluminação. Desta forma, a velo-



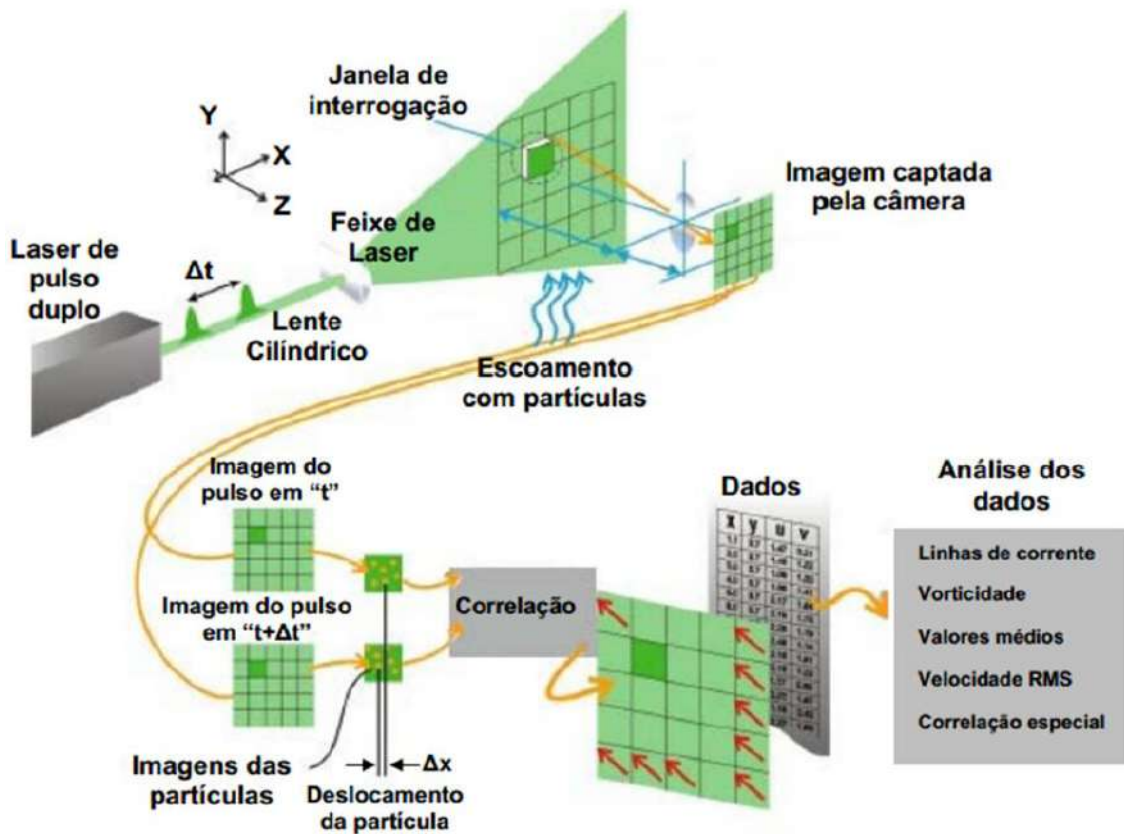


Figura 4.9: Etapas de funcionamento da técnica PIV (DANTEC DYNAMICS).

cidade a ser medida será, na prática, a velocidade das partículas traçadoras inseridas no escoamento. Portanto, para que a velocidade obtida seja uma representação fiel ao comportamento do escoamento, algumas condições básicas devem ser respeitadas.

A primeira condição diz respeito à velocidade de sedimentação das partículas. Para que as partículas possam acompanhar o escoamento, é necessário que sua velocidade de sedimentação, induzida gravitacionalmente, seja muito menor que a velocidade do escoamento. Considerando as partículas como esféricas, podemos calcular a velocidade de sedimentação a partir da Equação 4.3:

$$U_g = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho_f)g}{18\mu} \quad (4.3)$$

onde  $U_g$  é a velocidade de sedimentação,  $d_p$  é o diâmetro da partícula,  $\rho_p$  é a massa específica da partícula,  $\rho_f$  é a massa específica do fluido,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido e  $g$  é a aceleração da gravidade.

A segunda condição é relacionada à inércia das partículas. Como no escoamento o fluxo pode ser sujeito a mudanças abruptas de direção (como por exemplo durante a passagem de uma bolha), é necessário quantificar a capacidade da partícula de seguir a estas mudanças. Esta medida de inércia, denominada tempo de relaxação por RAFFEL (2007), pode ser obtida pela Equação 4.4:

$$T_r = d_p^2 \frac{\rho_p}{18\mu} \quad (4.4)$$

Quanto menor  $T_r$ , maior será a capacidade partícula de acompanhar o escoamento. Desta forma, deve-se, sempre que possível, trabalhar com partículas de pequeno diâmetro, a fim de minimizar os efeitos gravitacionais e de inércia. Porém, quanto menor a partícula, menor será a quantidade de luz refletida pela mesma, e mais difícil será a detecção desta pela câmera, sendo necessária a utilização de um *laser* de maior potência e de uma câmera mais sensível. Deve-se, portanto, encontrar uma relação ideal entre o tamanho das partículas e a capacidade do equipamento a ser utilizado.

No presente trabalho, utilizou-se como partícula traçadora a Rodamina 6G, que é estimulada pelo segundo harmônico (532 nm) de laser Nd-YAG. Este corante apresenta-se na forma de sólido cristalino de cor púrpura, com solubilidade de até 20 g/l em água e densidade de 1,26 g/cm<sup>3</sup>, sendo altamente estável à incidência de luz.

## Laser

O laser é o responsável por fornecer uma correta iluminação das partículas dispersas no fluido, de modo que seja possível sua detecção por meio da câmera. Para que isso ocorra, deve ser obtido um feixe plano de luz monocromática, com espessura, intensidade e duração controladas. O feixe deve possuir pequena espessura de modo que o foco da câmera possa ser ajustado para o perfil plano de partículas iluminadas na região de interesse.

Os tipos de laser mais utilizados para aplicações de PIV são os de Hélio-Neônio (*He-Ne*), íon de Argônio (*Ar*<sup>+</sup>) e Neodímio-YAG (*Nd-YAG*). Neste trabalho foi utilizado um laser pulsado do tipo (*Nd-YAG*), do inglês *Neodymium : Yttrium-Aluminium-Garnet*, um cristal chamado Ítrio-Alumínio-Granada dopado com íons de Neodímio.

O laser utilizado no PIV pode ser emitido continuamente ou de forma pulsada. Este possui a vantagem da pequena duração dos pulsos de luz, da ordem de nano a microssegundos. Desta forma, uma partícula se movendo em alta velocidade, será registrada como um instante “congelado” do escoamento, durante a pequena exposição à luz, obtendo-se pouco ou nenhum embasamento ao redor da partícula. O laser pulsado opera a partir da descarga de energia armazenada nos capacitores para uma fonte de energia eletromagnética chamada *flashlamp*, que excita os íons através de luz branca.

Essa excitação faz com que os átomos do componente emissor do laser emitam fótons em uma frequência proporcional à diferença de energia entre o estado excitado

e fundamental do material, retornando assim ao estado fundamental. Quando um fóton liberado atinge outro átomo ainda excitado, o mesmo provoca a liberação de outro fóton deste segundo átomo, com a mesma frequência e direção do primeiro, gerando assim uma reação em cadeia provocando uma grande liberação de radiação.

Em condições normais de operação, o laser Nd:YAG emite luz no comprimento de onda de  $1064 \text{ nm}$ . Este comprimento de onda é invisível ao olho humano, por estar na faixa de radiação infravermelha. Por motivos de segurança, esta luz passa então por um conjunto de cristais especiais denominado gerador harmônico, visando dobrar sua frequência, reduzindo assim o comprimento de onda pela metade. Desta forma, o comprimento de onda que sai do laser passa a ser de  $532 \text{ nm}$ , que corresponde ao comprimento da luz verde, único harmônico visível a olho nú, que é então direcionado ao conjunto óptico que resultará no feixe de luz plano. O conjunto óptico é formado por uma lente cilíndrica e outra esférica. A primeira expande o laser em um plano enquanto a segunda comprime o mesmo em um perfil fino. Desta forma, o laser pode ser direcionado para a região de interesse, iluminando apenas um fino perfil do escoamento.

### Aquisição de imagens

Segundo ADRIAN (1991), os métodos de captura de imagens para PIV podem ser divididos em dois métodos: (1) método que captura momentos sucessivos do escoamento em uma única imagem, com múltiplas iluminações (quadro único/múltiplas exposições) e (2) método que gera uma imagem para cada pulso de iluminação (quadros múltiplos/exposição única).

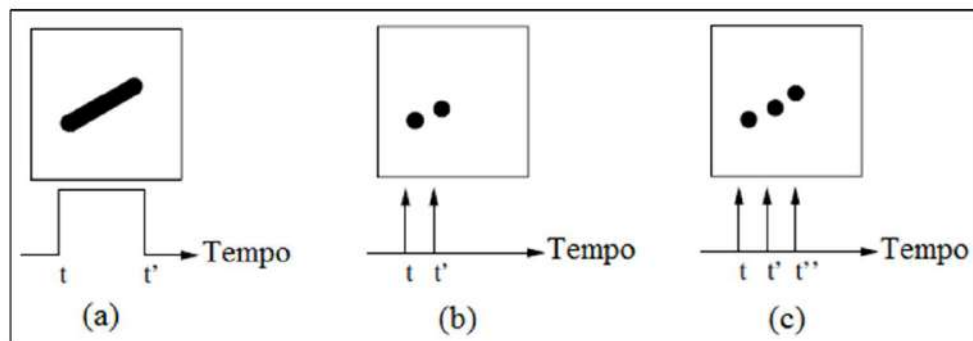


Figura 4.10: Quadro Único/Várias Exposições: (a) uma exposição, (b) duas exposições, (c) várias exposições - RAFFEL (2007).

A principal diferença entre os métodos é que o primeiro, sem esforços adicionais, não é capaz de reter informações referentes à ordem temporal das iluminações, podendo gerar dúvida quanto à direção do escoamento. Por outro lado, o método de múltiplas imagens e uma exposição, preserva automaticamente a ordem temporal

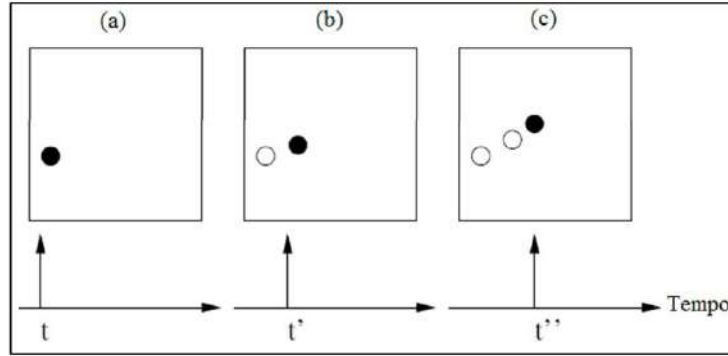


Figura 4.11: Vários Quadros/Uma Exposição: (a) primeiro quadro/ primeira exposição, (b) Segundo quadro/ segunda exposição, (c) terceiro quadro terceira exposição -RAFFEL (2007).

das imagens, sendo a escolha ideal caso os requisitos técnicos sejam cumpridos. O segundo método foi utilizado neste trabalho.

### Processamento de imagens por PIV

O processamento das imagens para obtenção dos campos de velocidade do escoamento foi realizado utilizando-se o *Software Dynamic Studio*. O campo de velocidade é calculado para cada par de imagens, obtendo-se a velocidade instantânea em toda a área analisada. Posteriormente uma média é calculada para obter o campo médio de velocidade.

O processo de obtenção dos campos de velocidade inicia-se com a aquisição de 100 imagens, escoando apenas líquido na tubulação. Uma média destas imagens é utilizada como imagem de fundo para o tratamento. As imagens do escoamento para a técnica PIV utilizada são adquiridas em pares (frame 1 e frame 2). Como o intervalo entre as imagens é de milissegundos, utilizam-se duas fontes de laser, cada uma iluminando um dos dois quadros. As duas fontes devem ser reguladas para que as imagens apresentem a mesma intensidade de iluminação. As imagens obtidas são então subtraídas da imagem de fundo, obtendo-se uma imagem que contém apenas as partículas traçadoras.

A determinação da velocidade do escoamento baseia-se em acompanhar no deslocamento das partículas traçadoras. Como não é possível acompanhar este deslocamento ao longo de toda a área de interesse, as imagens são divididas em áreas de busca menores, denominadas “janelas de interrogação”. A Figura 4.12 apresenta um exemplo de imagens do escoamento dividido em janelas de interrogação.

Para verificar o deslocamento de cada partícula dentro da janela de interrogação utiliza-se uma função denominada Correlação Cruzada, capaz de medir a similaridade entre dois padrões, no caso as partículas dispersas, e calcular o seu desloca-

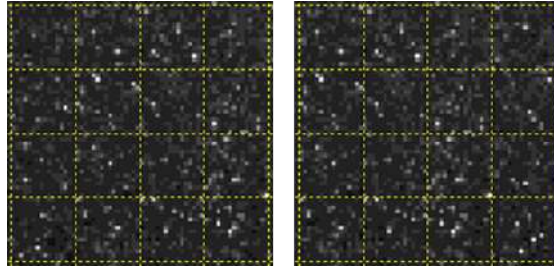


Figura 4.12: Janelas de interrogação da técnica de PIV.

mento. Isto pode ser exemplificado como o deslocamento necessário para sobrepor o frame 2 sobre o frame 1, de modo a exibir o mesmo padrão de partículas. Esta sobreposição é chamada convolução de imagens e a quantidade que representa o quão semelhantes as duas imagens são é denominada Coeficiente de Correlação ( $R$ ). A Figura 4.13 apresenta o plano de correlação, onde o pico representa a posição de sobreposição. O vetor deslocamento é definido como a distância entre este pico ( $x_{\max}$ ,  $y_{\max}$ ) e o centro da janela de interrogação da primeira imagem. Repetindo este procedimento para todas as janelas de interrogação obtém-se um campo dos vetores deslocamento para toda a imagem. Contudo, este método exige um grande esforço computacional.

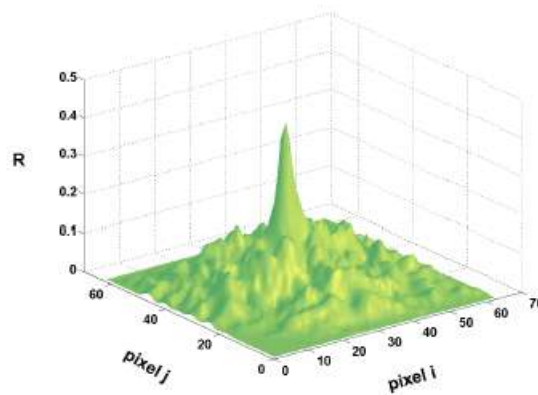


Figura 4.13: Exemplo do plano de correlação. Adaptado de Miranda (2004).

O método aqui utilizado foi o de Correlação Adaptativa. Ele calcula os vetores de velocidade com uma área de interrogação  $N$  vezes o tamanho da área de interrogação final e utiliza os resultados intermediários com informação para a próxima etapa, até que a área final é atingida. Para a aplicação da Correlação Adaptativa, foi utilizada uma janela de interrogação de  $8 \times 8$  *pixels*, com 3 etapas de refinamento, sendo a janela inicial analisada de  $64 \times 64$  *pixels*. Desta forma, pode-se realizar o processamento com maior velocidade em relação à Correlação Cruzada. Adicionalmente, foi utilizada sobreposição horizontal de 75% e vertical de 25%, refinamento *subpixel* e áreas de interrogação deformáveis. Nesta configuração, para o campo ve-

torial obtido, a distância entre vetores foi de 1 *mm*, sendo esta, portanto, a distância mínima da parede ou da bolha onde é possível obter a velocidade do escoamento.

A Correlação Adaptativa, ao identificar os pontos de referência em uma janela de interrogação, permite que a mesma se deforme ou rotacione de modo a acompanhar os pontos identificados, conferindo maior precisão nos resultados. Outra vantagem do método é a validação com base na vizinhança. Em cada etapa, os vetores são comparados com seus vizinhos, e caso um vetor não esteja dentro da margem de diferença definida, é automaticamente eliminado, evitando assim a presença de vetores espúrios no resultado final.

Para obter informações relativas a regiões específicas do escoamento com bolhas é necessário separar as imagens em grupos que apresentem a mesma condição. Desta forma, cada grupo de imagens adquiridas foi separado em pacotes com as regiões de maior interesse: pistão, filme líquido, nariz e cauda da bolha.

Na sequência, para evitar a falsa identificação de vetores na região da bolha, utilizou-se uma máscara sobre a bolha, fazendo com que a correlação de identificação de vetores não fosse aplicada sobre a mesma. Por fim, a partir dos mapas de vetores obtidos para cada par de imagens, pode-se calcular a média das velocidades na região de interesse, eliminando possíveis oscilações instantâneas e obtendo os dados de maior relevância do escoamento.

## 4.2 Descrição dos testes

O processo de avaliação das propriedades do escoamento com fluido reofluidificante inicia-se com um período de agitação do fluido, de modo a homogeneizar o mesmo, etapa esta que não precisa ser realizada quando utilizado água. Após esta agitação inicial, o fluido é posto em circulação, ajustando-se à vazão desejada e verificando a temperatura do mesmo. Inicia-se a injeção de gás a partir da abertura da válvula de bloqueio e ajuste da pressão e vazão desejadas. A pressão absoluta na tubulação de testes é medida a 1,5*m* da entrada.

No decorrer deste trabalho, os testes para caracterização do comportamento dos fluidos em condição bifásica foram divididos em três tipos distintos: testes de queda de pressão, dimensionamento por sombras e velocimetria por imagem de partículas, conforme será descrito a seguir.

### 4.2.1 Teste de avaliação de perda de carga

O teste de avaliação de queda de pressão consiste em medir a pressão diferencial entre as 20 primeiras tomadas e a última, totalizando um comprimento de 10*m* de linha. Para a avaliação da perda de carga no escoamento bifásico, onde ocorrem

oscilações de pressão devido à passagem das bolhas em momentos distintos em cada uma das tomadas de pressão, foram realizados testes aumentando-se gradativamente o número de aquisições, mantendo-se a taxa de aquisição fixa e observando a pressão medida em uma mesma condição de escoamento, até ser atingida a condição onde a pressão medida não variasse com o número de pontos medidos. Desta forma, determinou-se a realização de 2000 aquisições em um intervalo de 50 segundos para cada ponto, utilizando o medidor de pressão diferencial. Após a medição de cada tomada de pressão, a válvula que direciona o fluxo ao transdutor de pressão é fechada e é aberta a válvula da tomada seguinte. Após 30 segundos de estabilização inicia-se uma nova medição.

Os 20 pontos obtidos geram uma reta da queda de pressão do escoamento, determinando-se a diferença de pressão por unidade de comprimento. A obtenção desta reta permite reduzir erros de medição devido a alguma imperfeição na instalação das tomadas ou detectar possíveis obstruções nas mesmas. A Figura 4.14 exemplifica as medidas de perda de carga observada para a água nas 3 vazões utilizadas nos testes.

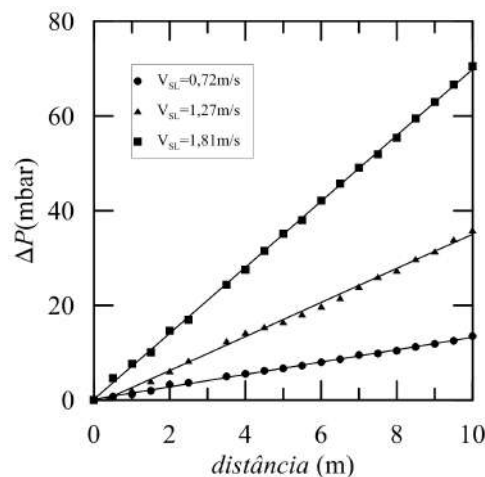


Figura 4.14: Perda de carga utilizando fluido newtoniano (água).

Este procedimento foi repetido com as 3 concentrações de fluidos reofluidificantes e também utilizando apenas água, para comparação com o fluido newtoniano. Para cada fluido, foram utilizadas 3 vazões de líquido e 3 de gás, totalizando 9 condições de vazão líquido/gás. Além dos escoamentos bifásicos foram realizadas medições nas 3 vazões de líquido utilizando apenas o escoamento monofásico. No total, foram obtidas 48 relações de perda de carga linear, sendo 36 bifásicas e 12 monofásicas. As condições utilizadas e os resultados obtidos serão apresentados no capítulo de resultados.

## 4.2.2 Teste de Dimensionamento por Sombras

O segundo tipo de teste concentra as medições utilizando Dimensionamento por Sombras. Para este tipo de medição, um difusor de luz foi utilizado entre a caixa de acrílico e a fonte de luz, de modo que a luz emitida fosse espalhada em toda superfície, sem atingir diretamente a mesma. A abertura da lente e a intensidade dos LEDs são ajustadas para que a imagem capturada não apresente sub ou sobre-exposição, de modo que todas as regiões da imagem estejam nítidas. As dimensões da imagem são então calibradas a partir de uma escala previamente conhecida, usando-se por base o diâmetro do tubo, conforme descrito anteriormente na seção "Dimensionamento por Sombras (Shadow Siser)". Após a calibração, são ajustadas as vazões de líquido e gás necessárias para a condição de teste desejada, dando prosseguimento à aquisição de imagens.

Inicialmente são adquiridas 2000 imagens a uma frequência de 100  $Hz$ . A partir destas imagens, é medido o deslocamento do nariz da bolha, comparando imagens sucessivas, e calcula-se a velocidade de deslocamento. O procedimento é repetido para 20 bolhas, para obter a velocidade média das bolhas. Com esta velocidade é calculada a frequência de aquisição necessária para que o deslocamento da bolha no intervalo entre duas aquisições seja exatamente o comprimento de uma imagem da câmera, de modo que a bolha completa possa ser formada a partir da composição de imagens sucessivas. Uma aquisição de 1000 imagens é realizada na frequência calculada para obtenção das bolhas completas, conforme apresentado no Capítulo 5, Figuras 5.4 a 5.7.

Para o processamento no *Mathematica*®), são realizadas duas novas aquisições de 5000 imagens cada, novamente na frequência de 100  $Hz$ , obtendo-se as informações necessárias para posterior tratamento. Devido à possibilidade de degradação do fluido, todos os testes necessários para cada concentração são realizados em um período de três dias, realizando-se o tratamento das imagens após o fim dos testes.

Após cada teste, a injeção de ar e a circulação de líquido são paradas, deixando o fluido em repouso para que as bolhas dispersas tenham tempo para vencer a tensão superficial do líquido e chegar à superfície, de modo que ao iniciar o próximo teste apenas o líquido seja bombeado. O controle de tempo de descanso necessário é feito de forma visual através da janela de observação instalada na lateral do tanque.

## 4.2.3 Teste de Velocimetria por Imagem de Partículas

O terceiro tipo de teste é referente às medições utilizando Velocimetria por Imagem de Partículas. Para este teste, utiliza-se o mesmo sistema de aquisição de imagens do Dimensionamento por Sombras. Além deste, para que a câmera fosse capaz de iden-



tificar as partículas de Rodamina, foi posicionado em frente aos LEDs uma película alaranjada que filtra os comprimentos de onda menores que  $550\text{ nm}$ . Desta forma, a câmera continua sendo capaz de captar a imagem das bolhas pelo Dimensionamento por Sombras ao mesmo tempo em que identifica as partículas.

A intensidade de cada fonte de laser é ajustada no menor nível possível que permita a visualização das partículas, evitando a sobre-exposição de luz na câmera.

As partículas de Rodamina refletem a luz emitida pelo laser no mesmo comprimento de onda ( $532\text{ nm}$ ), e emitem luz em um segundo comprimento, entre  $570$  e  $575\text{ nm}$ . Para evitar que os reflexos do laser na tubulação atrapalhem a medição, um filtro para comprimentos de onda menores que  $570\text{ nm}$  foi posicionado em frente à lente da câmera.

Todo o sistema, incluindo as duas fontes de emissão de laser, câmera e LEDs são sincronizados pelo computador, permitindo que sejam capturadas tanto as imagens da bolha (fundo) quanto as partículas de Rodamina em uma única imagem.

Conforme descrito anteriormente, a aquisição de imagens para o PIV é feita em quadro duplo (*double frame*), ou seja, duas imagens por quadro, separadas por um pequeno intervalo de tempo. Para as condições testadas, o intervalo entre as duas imagens do quadro foi de  $600$  ou  $800\ \mu\text{s}$ , a depender da vazão de líquido. A frequência de aquisição de imagens utilizada foi de  $15\text{ Hz}$ . A configuração completa utilizada na aquisição é apresentada no Apêndice A. Para cada condição foram feitas duas aquisições de  $5000$  pares de imagens. Após cada teste, o fluido permanece em repouso para eliminar as bolhas dispersas, como descrito na seção anterior.

# Capítulo 5

## Resultados

A seguir serão apresentados os resultados obtidos na realização deste trabalho. Visando validar a bancada experimental, inicialmente foram realizados testes utilizando apenas fluido newtoniano (água) na tubulação, permitindo assim que seja conferida a perda de carga obtida experimentalmente com a teórica calculada para tubulação lisa, considerando o escoamento monofásico.

A validação das medições de pressão e vazão obtidas na bancada de teste foi feita a partir da comparação dos dados de perda de carga obtidos com os previstos para a tubulação lisa, conforme diagrama de Nikuradse apresentado na Figura 5.1.

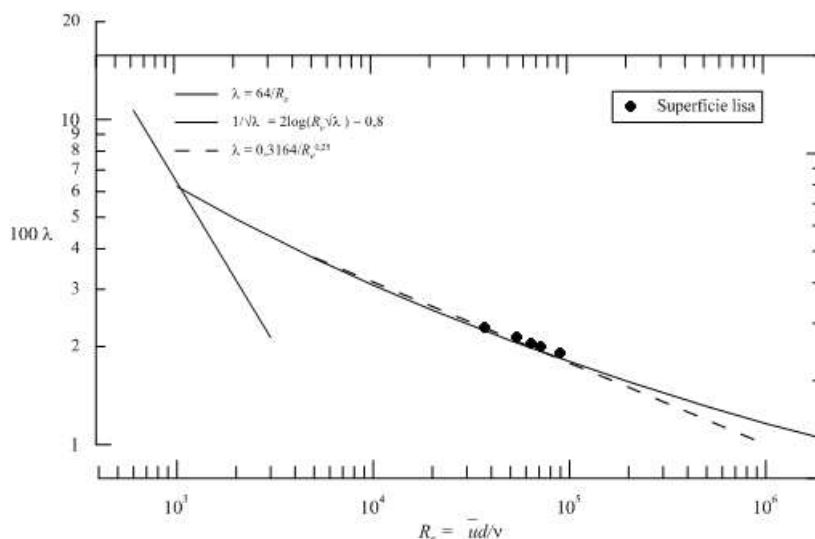


Figura 5.1: Perda de carga em tubulação lisa utilizando fluido newtoniano (água).

Após a validação do aparato para a medição utilizando apenas água, passou-se para a experimentação bifásica, mantendo-se o fluido newtoniano como fase líquida. Esta etapa teve por objetivo a verificação da instrumentação para aferição da perda de carga nesta condição, bem como a realização de testes iniciais utilizando o Dimensionamento por Sombras, determinando as características principais do escoamento pistonado, e gerando assim dados de comparação para os fluidos reofluidificantes.

Para realização dos testes de escoamento multifásico, foram escolhidas três vazões de gás de modo que fosse gerado o padrão de escoamento pistonado nas diversas vazões de líquido ensaiadas inicialmente. Para cada fluido, foram utilizadas três vazões de líquido e três de gás, totalizando nove condições de testes. A Tabela 5.1 apresenta as vazões de água e gás utilizadas. As mesmas vazões foram utilizadas com cada um dos três fluidos refluidificantes que serão apresentados na etapa seguinte desta dissertação.

Teste	$V_{SL} [m/s]$	$V_{SG} [m/s]$
T1	0,72	0,27
T2	0,72	0,49
T3	0,72	0,78
T4	1,27	0,22
T5	1,27	0,42
T6	1,27	0,68
T7	1,81	0,21
T8	1,81	0,43
T9	1,81	0,65

Tabela 5.1: Vazões dos testes com escoamento bifásico água e gás.

A Figura 5.2 apresenta as condições experimentais ensaiadas localizadas no mapa de padrões de escoamento de CHHABRA (2008). Todas as condições escolhidas visando analisar apenas a região de escoamento pistonado.

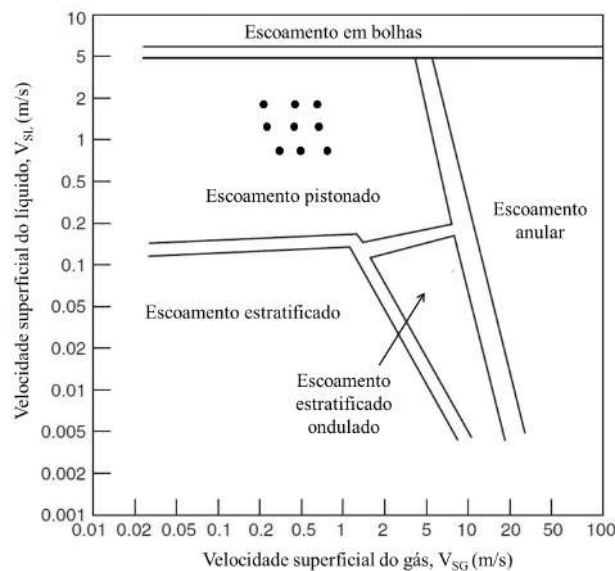


Figura 5.2: Condições experimentais situadas no mapa de padrões para escoamento horizontal. Adaptado de CHHABRA (2008).

## 5.1 Testes com fluidos reofluidificantes

A seguir serão apresentados os resultados obtidos com os três fluidos reofluidificantes testados, em concentrações de CMC de 0,05%, 0,1% e 0,2%, comparando os mesmos com os dados de referência obtidos com água.

Para garantir repetibilidade das propriedades do fluido durante todos os testes, e verificar a possível degradação do fluido devido à quebra de cadeias poliméricas, foram retiradas amostras no fluido antes, durante e após a realização dos mesmos, totalizando 3 amostras por fluido, as quais foram submetidas a testes de reologia. Para uma aproximação inicial, foi utilizado o modelo Lei de Potência para descrever o comportamento do fluido.

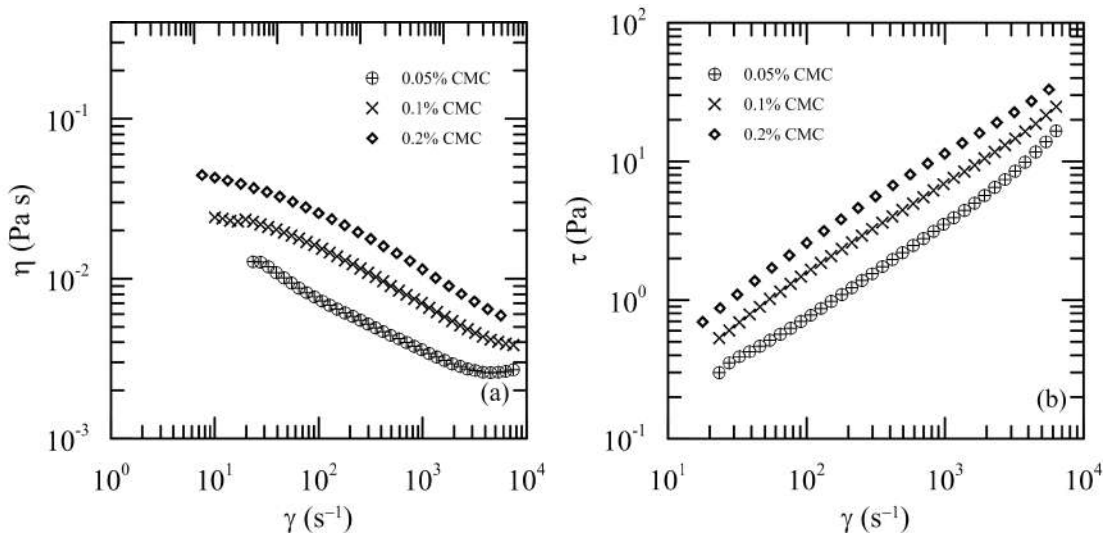


Figura 5.3: Caracterização dos fluidos de trabalho:(a)Viscosidade e (b) Tensão de cisalhamento como função da taxa de deformação para as soluções de CMC a 25°C.

A Tabela 5.2 apresenta as propriedades reológicas dos fluidos utilizados. A variação entre as medições das propriedades dos fluidos, entre as condições inicial e final, foi de até 2,5%, verificando assim que não houve uma degradação significativa no fluido. Resultados típicos das curvas de caracterização dos fluidos são apresentados na Figura 5.3.

Fluido	Concentração $c$ (%)	$K$ (Pa s <sup><math>n</math></sup> )	$n$ (-)
Água	-	0,0009	1,00
CMC005	0,05	0,0263	0,71
CMC01	0,1	0,0827	0,64
CMC02	0,2	0,1567	0,62

Tabela 5.2: Propriedades reológicas dos fluidos.

A figura 5.4 apresenta alguns dos padrões de escoamento observados no regime bifásico utilizando água como meio líquido. Devido ao maior cisalhamento que

ocorre nas vazões elevadas, pode-se observar a presença de algumas bolhas dispersas no escoamento, como ocorre no caso (c).

A adição do polímero CMC na água, mesmo em pequenas concentrações resulta em alterações significativas na reologia do fluido, e conseqüentemente no comportamento do escoamento. Uma das alterações relevantes observadas no presente trabalho foi o alto grau de aeração na fase contínua do fluido.

As figuras 5.5, 5.6 e 5.7 apresentam alguns dos padrões de escoamento observados no regime bifásico utilizando as três soluções de CMC utilizadas neste trabalho como meio líquido. Como se pode observar, mesmo a baixas vazões, há certo número de pequenas bolhas dispersas no pistão líquido. À medida que aumentam as vazões de líquido, e conseqüentemente os efeitos turbulentos no escoamento, verifica-se maior dispersão das bolhas de gás, que passam a estarem presentes em toda a seção transversal do pistão, porém sempre em maior concentração na parte superior da tubulação.

Para o escoamento de água observa-se a presença de poucas bolhas concentradas na parte superior da tubulação (Figura 5.4). À medida que aumenta a concentração de CMC no fluido, e também a viscosidade aparente do mesmo, observa-se que as bolhas dispersas passam a ocupar grande parte da seção transversal, e não mais apresentam a tendência a coalescer. A fração de vazios no pistão líquido aumenta consideravelmente, apresentando-se de forma quase homogênea em todo o pistão (Figura 5.7).

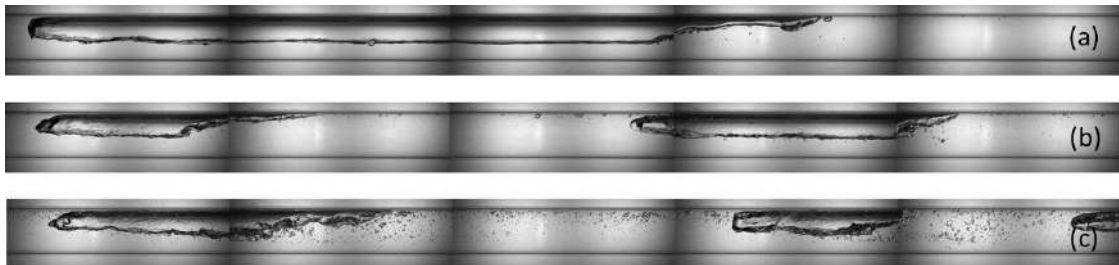


Figura 5.4: Padrões de escoamento ar-água para escoamento pistonado: (a)  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ , (b)  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (c)  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,43 \text{ m/s}$ .

Pode-se observar claramente o efeito do aumento da concentração de CMC no desenvolvimento do escoamento. À medida que se aumenta a concentração do composto, com conseqüente alteração das características reológicas, observa-se uma diminuição considerável dos comprimentos das bolhas, além da maior concentração de bolhas dispersas no pistão líquido.

Também no formato da bolha podem-se notar diferenças importantes. As bolhas na água apresentam uma superfície irregular e com muitas perturbações. À medida que aumenta a concentração de CMC, as bolhas passam a ter um formato mais liso,

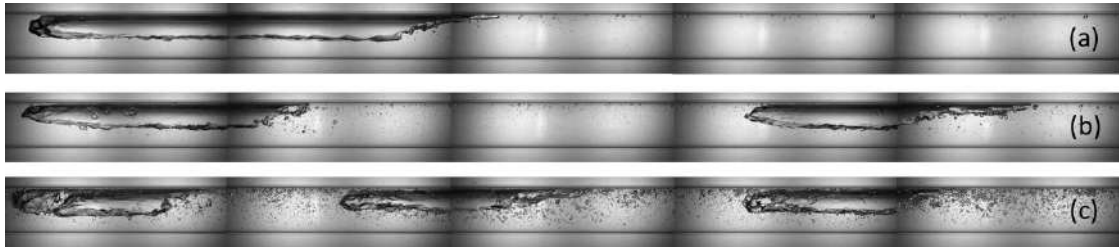


Figura 5.5: Padrões de escoamento ar-0,05% CMC para escoamento pistonado: (a)  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ , (b)  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (c)  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,43 \text{ m/s}$ .

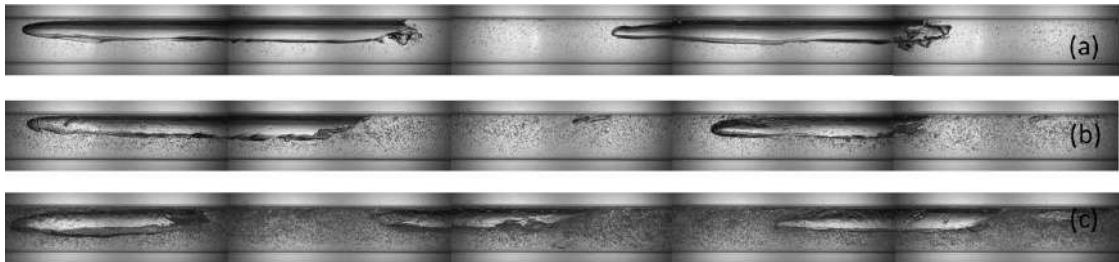


Figura 5.6: Padrões de escoamento ar-0,1% CMC para escoamento pistonado: (a)  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ , (b)  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (c)  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,43 \text{ m/s}$ .

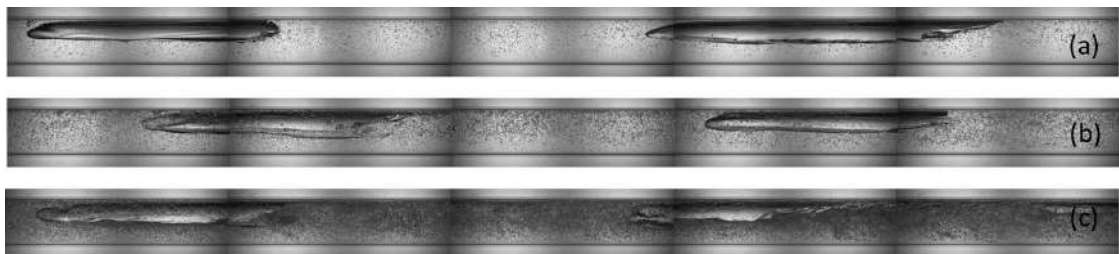


Figura 5.7: Padrões de escoamento ar-0,2% CMC para escoamento pistonado: (a)  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ , (b)  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ , (c)  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,43 \text{ m/s}$ .

com nariz arredondado e sem muitas reentrâncias na superfície.

À medida que aumenta a resistência ao deslocamento da bolha no líquido, devido à redução do  $n$ , observou-se que a superfície da bolha tende a se afastar do bordo superior da tubulação, principalmente em sua parte inicial (nariz), deslocando-se para o meio da seção transversal do tubo.

### 5.1.1 Perda de carga

A Figura 5.8 apresenta uma comparação da perda de carga linear ao longo da tubulação para as três concentrações de CMC utilizadas, comparando com os valores obtidos para a água.

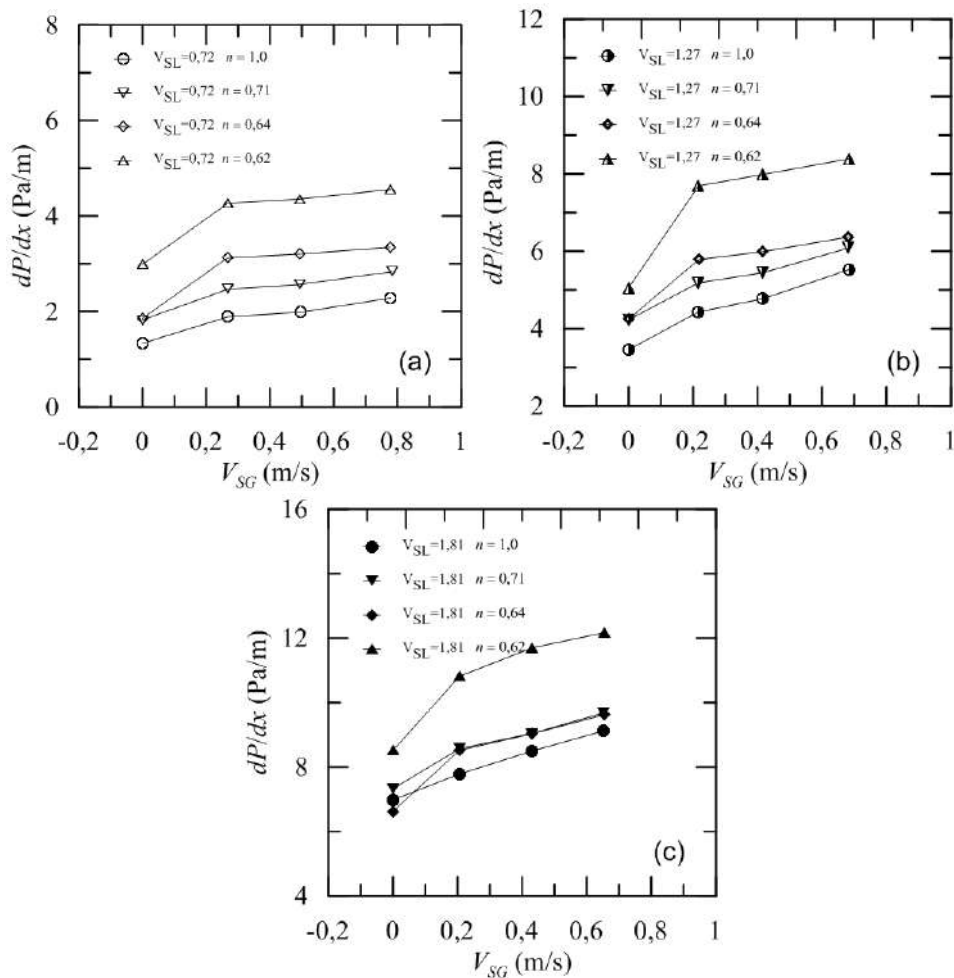


Figura 5.8: Perda de carga experimental para água e os três fluidos reofluidificantes testados: (a)  $V_{SL} = 0,72$  m/s, (b)  $V_{SL} = 1,27$  m/s, (c)  $V_{SL} = 1,81$  m/s.

Como se pode observar, para as vazões utilizadas neste trabalho, todos os fluidos causaram um acréscimo na perda de carga quando em escoamento bifásico, não sendo observados os efeitos de redução de arrasto, como já reportado na literatura. Apenas no escoamento de líquido na concentração de 0,1% de CMC foi obtida uma pequena

redução de 5%, para  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ . Também para o escoamento de líquido, observa-se um aumento de perda de carga considerável com a maior concentração de CMC (0,2%). Nesta concentração, para  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , o aumento na perda de carga foi de 124%.

A Tabela 5.3 apresenta uma comparação das variações de perda de carga observadas nos fluidos reofluidificantes quando comparados com a água, considerando as condições de escoamento bifásico apresentadas na Tabela 5.1. Ao analisar o escoamento bifásico, observamos que a perda de carga obtida com CMC nas concentrações 0,05 e 0,1% tende a se aproximar à medida que aumenta a vazão de líquido, sendo praticamente igual para  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ . Também entre estes dois fluidos, ao aumentar a vazão de gás, nas condições  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$  observou-se uma aproximação dos valores de perda de carga registrados.

$V_{SL} \text{ (m/s)}$	Teste	n = 0,71	n = 0,64	n = 0,62
0,72	T1	30%	65%	126%
	T2	29%	61%	116%
	T3	24%	46%	100%
1,27	T4	17%	31%	74%
	T5	14%	26%	67%
	T6	10%	15%	52%
1,81	T7	10%	9%	39%
	T8	6%	6%	38%
	T9	6%	6%	33%

Tabela 5.3: Variação da perda de carga no escoamento bifásico dos fluidos a base de CMC em relação a água. Testes conforme a Tabela 5.1.

Na comparação entre os fluidos CMC 0,2% e água, observa-se que, a baixas vazões de líquido, a queda de pressão observada no fluido reofluidificante é até 126% superior a da água, e à medida que são aumentadas as vazões, esta diferença cai para 33%, na condição  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,65 \text{ m/s}$ , ressaltando o efeito de alteração da reologia deste fluido. O mesmo efeito de alteração das propriedades devido ao cisalhamento é observado para os outros fluidos, mesmo que em menor grau.

### 5.1.2 Comprimento de bolhas

As figuras 5.9 e 5.10 apresentam as medidas de comprimento da bolha, comprimento do pistão líquido e comprimento da célula unitária, respectivamente, comparados com os valores obtidos para o escoamento com fluido newtoniano (água).

Conforme se pode observar na Figura 5.9, as diferenças mais significativas nos comprimentos de bolhas dos fluidos reofluidificantes ocorre na menor vazão de líquido



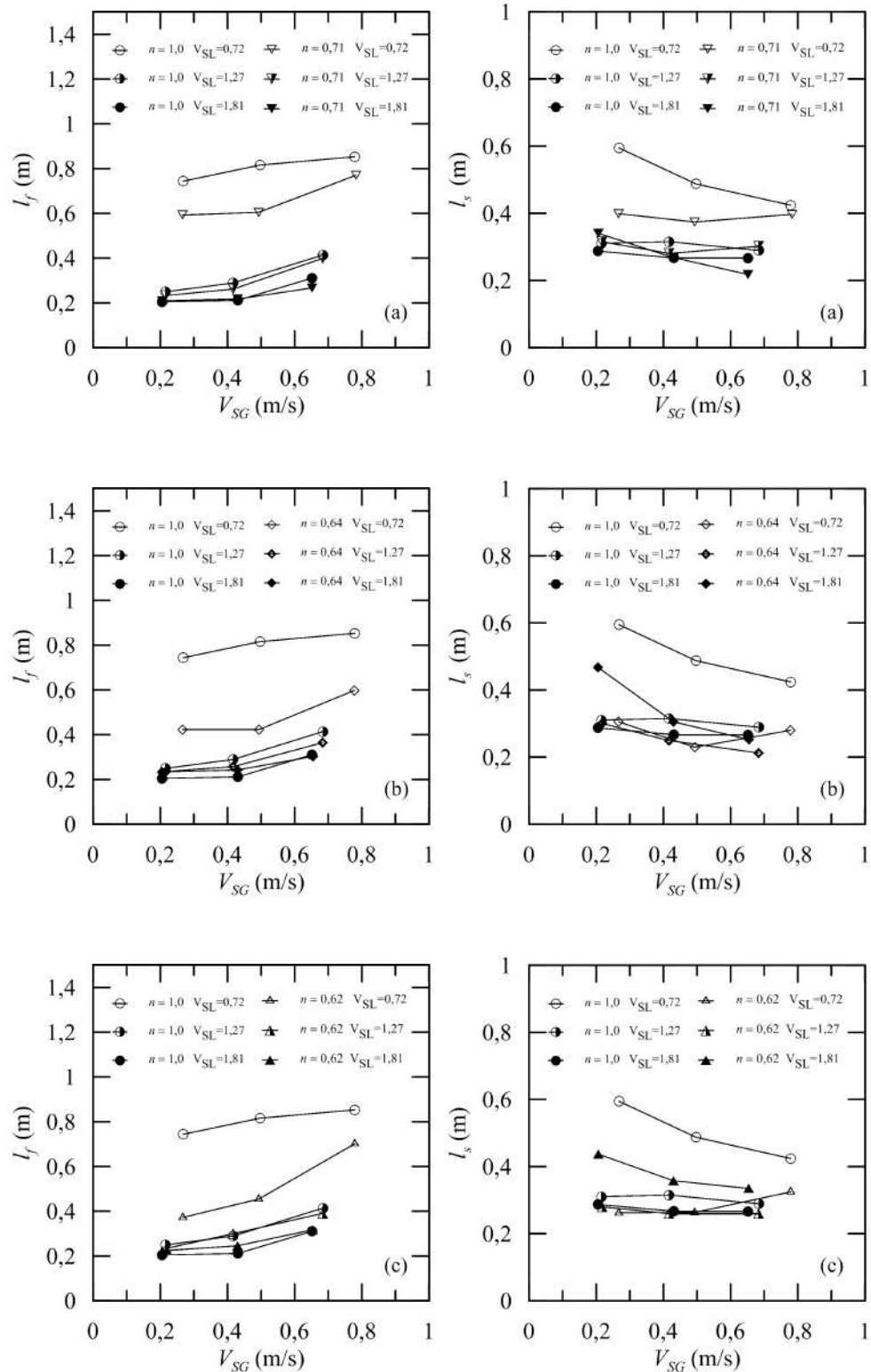


Figura 5.9: Efeitos da vazão e do índice de comportamento dos fluidos Lei de Potência no comprimento das bolhas -  $l_f$  - (esquerda) e do pistão líquido -  $l_s$  - (direita): comparação entre ar-água e (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.

( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ), condição em que o fluido apresenta os maiores efeitos da viscosidade. Ao aumentar o cisalhamento, o comportamento passa a se aproximar ao do fluido newtoniano, motivo pelo qual os comprimentos de bolha são semelhantes ao da água nas maiores vazões.

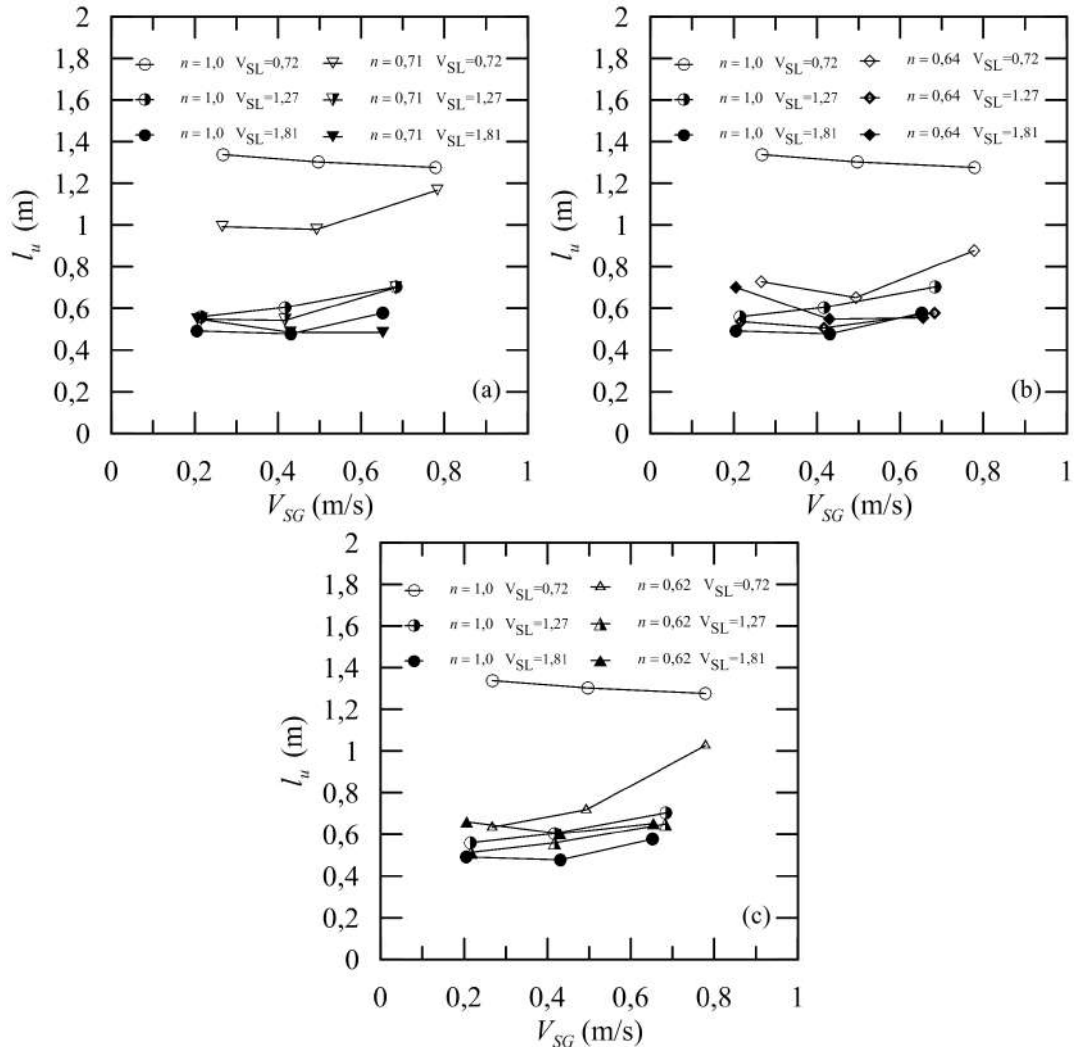


Figura 5.10: Efeitos da vazão e do índice de comportamento dos fluidos Lei de Potência no comprimento unitário: comparação entre ar-água e (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.

Os gráficos de comprimento de bolha (Figura 5.9 - esquerda) mostram presença de efeitos mais significativos a baixa vazão de líquido, produzindo uma queda de até 50% em  $l_f$  (b). Para altas vazões de líquido, devido ao cisalhamento e consequente redução de viscosidade aparente, os comprimentos de bolha observados foram próximos aos da água.

Ao analisar os gráficos de comprimento de pistão líquido (Figura 5.9-direita), pode-se observar na menor vazão de líquido ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ) que os fluidos reofluidificantes apresentam um leve acréscimo no comprimento de pistão líquido ( $l_s$ ) com o aumento da vazão de gás, enquanto na água verifica-se uma queda signifi-

cativa deste comprimento. O comportamento pode ser explicado pelo aumento da concentração de bolhas dispersas no pistão líquido, em proporção muito superior àquela observada na água, aumentando assim o volume do pistão, como verificado nas Figuras 5.4 a 5.7.

Por outro lado, verifica-se na maior vazão de líquido ( $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ ) que, a baixas vazões de gás, os fluidos com a presença de CMC apresentam  $l_s$  até 60% superiores à água (b), porém à medida que a vazão de gás aumenta, esta diferença reduz e, em algumas condições, passa a ser negativa (a), com  $l_s$  22% menor que o da água.

Observa-se na Figura 5.10 que os maiores efeitos dos fluidos reofluidificantes no comprimento unitário ocorrem na menor vazão de líquido ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ). Nesta condição, a depender do fluido utilizado e da vazão de gás, observa-se uma redução no comprimento unitário variando entre 10% (a) e 53% (c), quando comparado com os valores para a água.

Assim como verificado nos gráficos anteriores, nota-se uma influência menos significativa nesta característica quando utilizada a vazão de líquido intermediária ( $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ ), com a ocorrência de pequenas variações para mais ou para menos no comprimento unitário. Pode-se observar, porém, que para a maior vazão de líquido ( $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ ), ocorre um aumento considerável do comprimento unitário, chegando a 43% (b) em algumas condições, principalmente devido ao aumento do comprimento do pistão líquido e à presença considerável de bolhas dispersas no mesmo, aumentando seu volume.

As Figuras 5.11, 5.12 e 5.13 apresentam as distribuições de comprimento de bolha ( $l_f$ ) e de pistão líquido ( $l_s$ ) para as três vazões de líquido,  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ,  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$  e  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ , respectivamente. Observa-se, nas maiores vazões de líquido, que o aumento da vazão de gás faz com que o comprimento de bolha gerado esteja em um intervalo maior, enquanto que a baixas vazões de gás o comprimento de bolha obtido é concentrado em um pequeno intervalo, com bolhas de menor comprimento. Para a menor vazão de líquido ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ) observa-se uma distribuição de ( $l_f$ ) em um intervalo mais longo, o qual sofre uma pequena alteração no comprimento médio das bolhas com o aumento da vazão, porém mantendo grande variedade de comprimentos.

No comprimento de pistão líquido a alteração ocorre no sentido oposto, ou seja, os pistões diminuem de tamanho com o aumento da vazão de gás. Esta variação é mais intensa para  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ , onde o comprimento médio das bolhas cai praticamente pela metade com o aumento da vazão de gás. Nas menores vazões de líquido esta redução também ocorre, porém de maneira mais sutil.

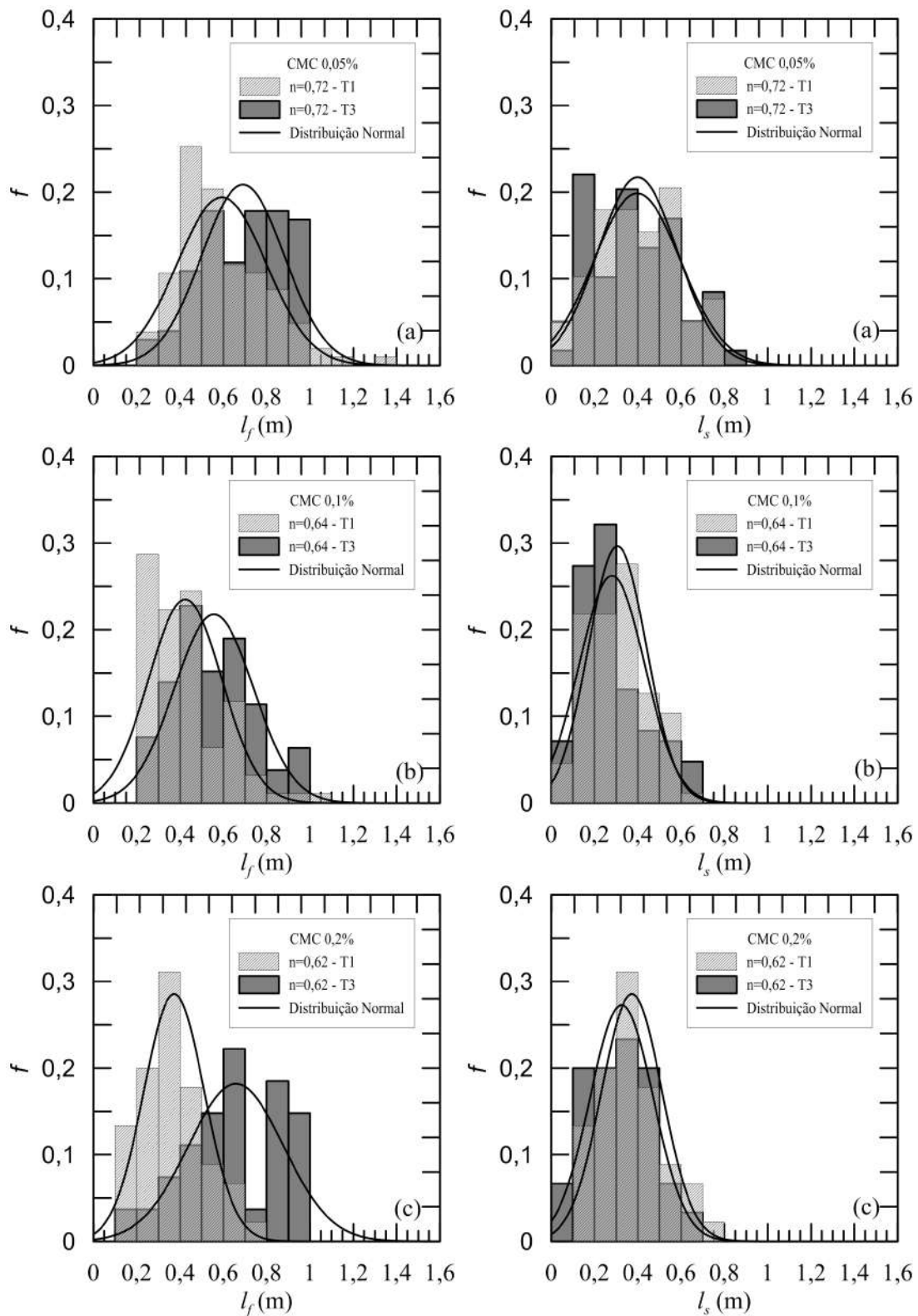


Figura 5.11: Comparação das distribuições de comprimento de bolha e de pistão líquido para  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , nas condições de teste T1 e T3: (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.

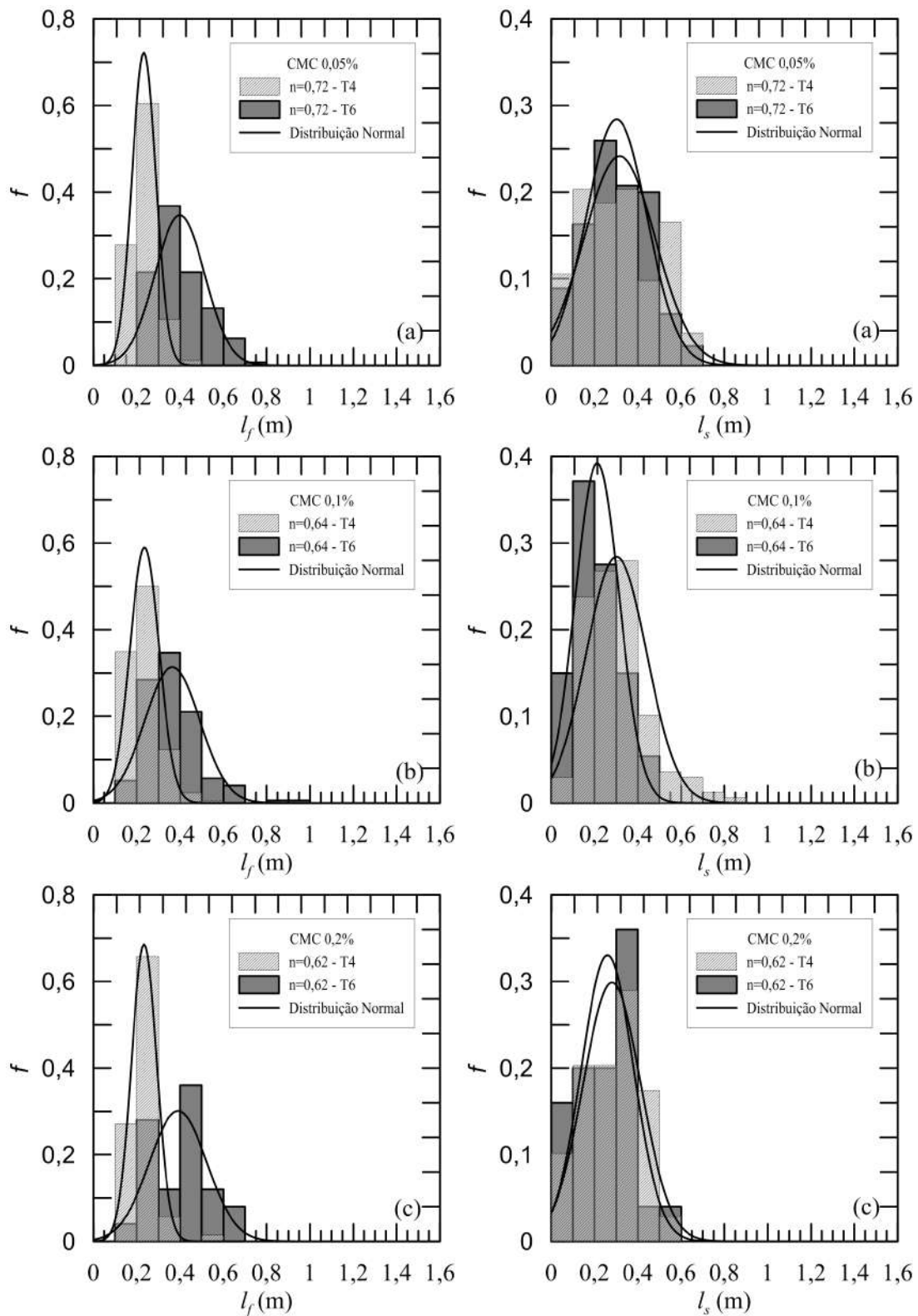


Figura 5.12: Comparação das distribuições de comprimento de bolha e de pistão líquido para  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , nas condições de teste T4 e T6: (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.

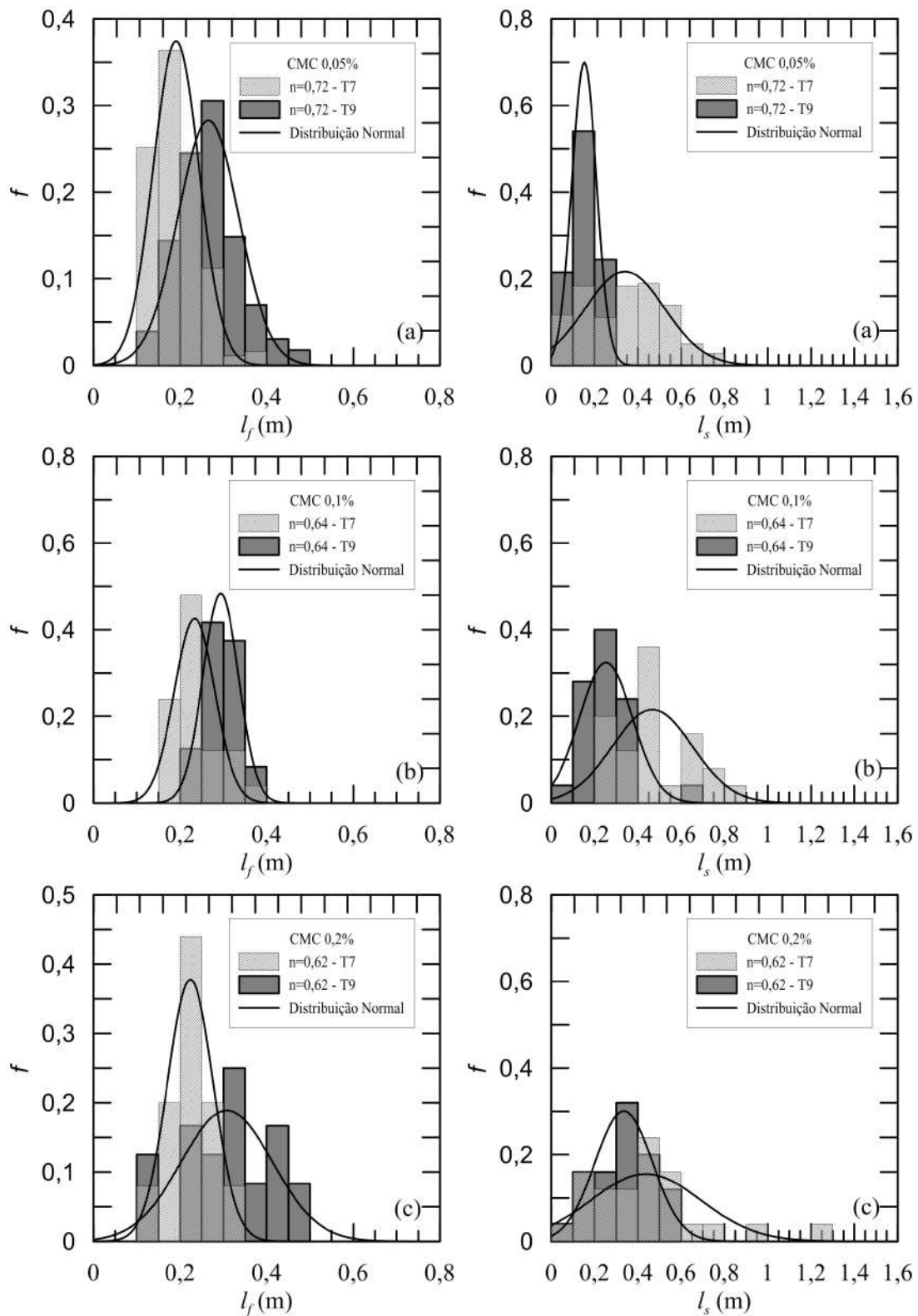


Figura 5.13: Comparação das distribuições de comprimento de bolha e de pistão líquido para  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ , nas condições de teste T7 e T9: (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.

### 5.1.3 Frequência de passagem de bolhas

A Figura 5.14 apresenta a influência da vazão e reologia do fluido na frequência de passagem de bolhas ( $\nu_t$ ).

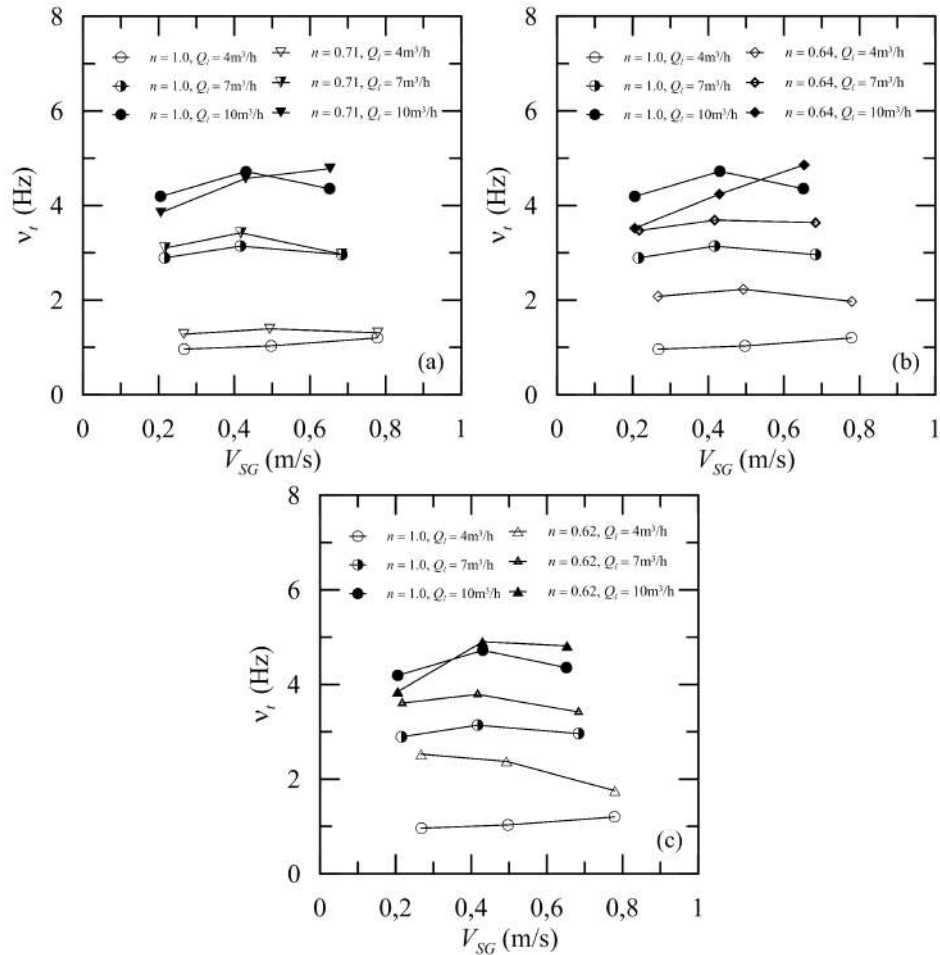


Figura 5.14: Efeitos da velocidade superficial e do índice de comportamento dos fluidos Lei de Potência na frequência de bolhas: comparação entre ar-água e (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.

Observa-se que a diminuição no  $n$  provoca um aumento de  $\nu_t$ . Este efeito é mais pronunciado para a menor vazão de líquido. De fato, para a menor vazão de líquido, a redução do  $n$  resulta em um aumento da frequência de bolhas de ordem de 2 vezes para algumas condições ( $n = 0,64$  e  $0,62$ ). À medida que a vazão de líquido aumenta, a influência da concentração de CMC é minimizada. Observa-se também que a vazão de gás representou pouca influência nas frequências observadas.

Conforme reportado por SOLEIMANI (2002), a adição de polímeros redutores de arrasto pode influenciar nas características das ondas interfaciais, que dependem fortemente do nível de turbulência do escoamento. Altos níveis de turbulência distorcem a interface da bolha, levando a sua quebra. Este efeito pode estar relacionado ao polímero utilizado neste trabalho.

No início da tubulação, a injeção de gás ocorre ortogonalmente ao escoamento de líquido e imediatamente antes de uma junção tipo "T" (Figura 4.3) que conduz ao escoamento horizontal, resultando em um fluxo altamente turbulento no início do trecho horizontal. Conforme observado por SUAREZ (2016), esta condição de injeção de gás ortogonal ao escoamento do líquido gera vorticidades que provocam grande penetração do jato de gás no líquido, provocando a quebra das bolhas. O aumento da viscosidade acentua a penetração e conseqüentemente a geração de bolhas menores.

Por outro lado, a maioria das correlações para predição de  $\nu_t$  disponíveis na literatura levam em conta apenas  $V_{SL}$ ,  $V_m$ ,  $g$  e  $D$  como parâmetros relevantes. As propriedades reológicas do fluido não são levadas em consideração, visto que a grande maioria dos experimentos é realizada apenas com ar e água.

#### 5.1.4 Velocidade de translação das bolhas

A Figura 5.15 apresenta as velocidades médias de translação das bolhas, medida como a velocidade de deslocamento do nariz da bolha, comparando os fluidos a base de CMC com a água. Pode-se observar que a variação na velocidade para o fluido com 0,05% de CMC foi pouco significativa, quando comparado com a água (a), apresentando variações de até 5%. Para os fluidos com maior concentração de CMC ( $n = 0,62$  e  $0,64$ ) os efeitos são mais significativos, chegando a até 22% de aumento em  $V_t$  em relação à água (b) e (c).

A Figura 5.16 apresenta uma comparação da velocidade de translação das bolhas, medida como a velocidade de deslocamento do nariz da bolha, e a velocidade de mistura do escoamento (Equação 5.1).

$$V_m = \frac{1}{A} \left( \frac{W_L}{\rho_L} + \frac{W_G}{\rho_G} \right) \quad (5.1)$$

onde  $V_m$  é a velocidade de mistura,  $A$  é a área da seção transversal, e  $W$  e  $\rho$  são a vazão mássica e a massa específica do líquido ( $L$ ) e do gás ( $G$ ).

Como pode ser observado, os três patamares presentes no gráfico, representam as três vazões de líquido utilizadas. Na maioria dos casos, o acréscimo na concentração de CMC resultou em um aumento de  $V_t$ , justificado pela diminuição do comprimento unitário e aumento da frequência de passagem de bolhas, como mostrado nas seções anteriores.

Este comportamento, contudo, não foi observado para  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$  nos dois fluidos de maior concentração de CMC. Na condição de maior  $V_m$  observa-se uma redução na  $V_t$ , possivelmente justificável pelo aumento de  $l_f$ .

A Figura 5.17 mostra uma comparação das distribuições de velocidade de translação das bolhas para os 3 fluidos reofluidificantes e a água, em duas vazões



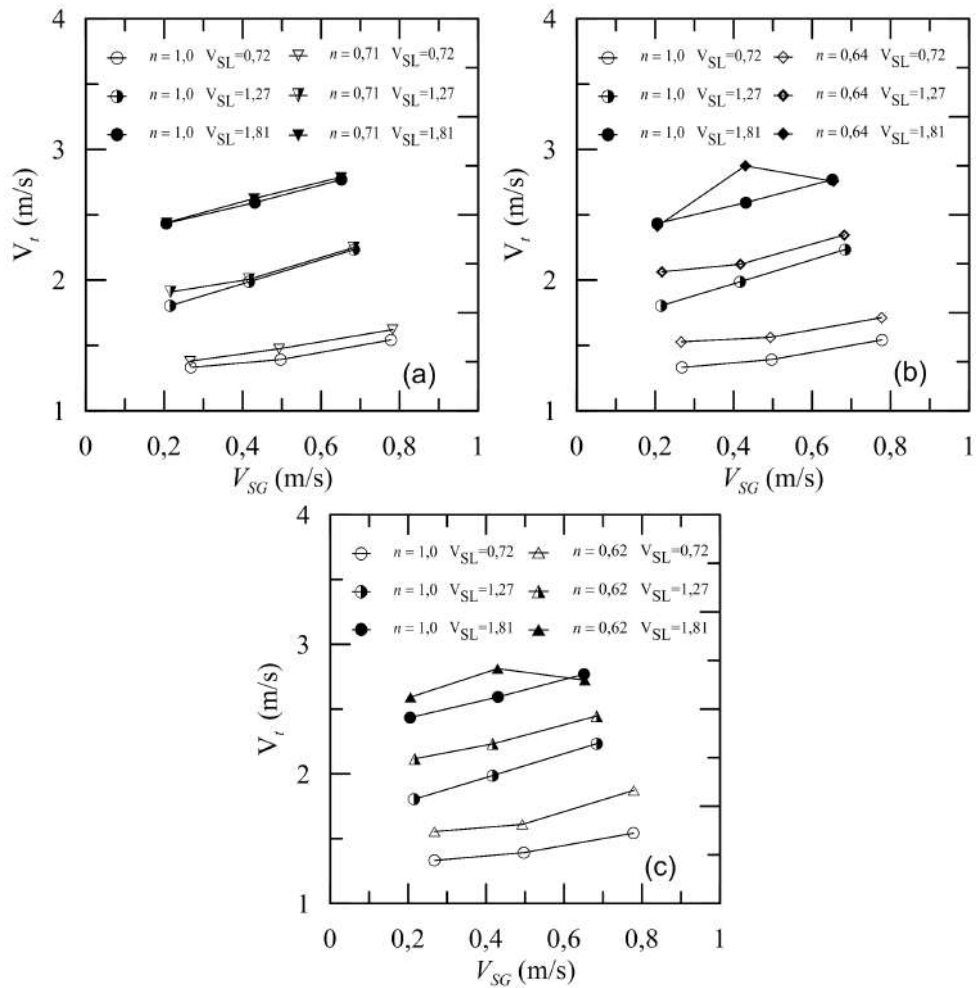


Figura 5.15: Efeitos da vazão e do índice de comportamento dos fluidos Lei de Potência na velocidade de translação das bolhas ( $V_t$ ): comparação entre ar-água e (a) ar-solução 0,05% CMC, (b) ar-solução 0,1% CMC, (c) ar-solução 0,2% CMC.

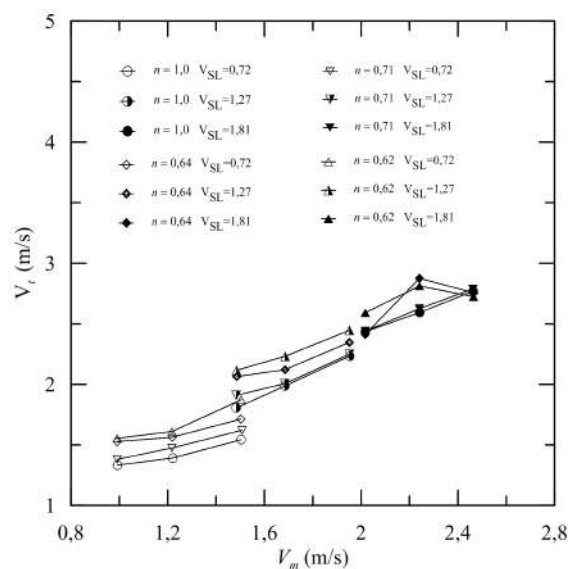


Figura 5.16: Efeitos da vazão e do índice de comportamento dos fluidos lei de potência na velocidade de translação das bolhas.

de líquido distintas:  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  (T1) e  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$  (T4). Na maioria dos casos, as curvas de distribuições não apresentam diferenças significativas quanto ao seu formato, verificando-se apenas o aumento de velocidade média das bolhas com o acréscimo na concentração de CMC dos fluidos. Para o CMC 0,2%, porém, observa-se uma pequena diferença na distribuição das velocidades, com maior concentração de bolhas de maior velocidade, para a condição T4.

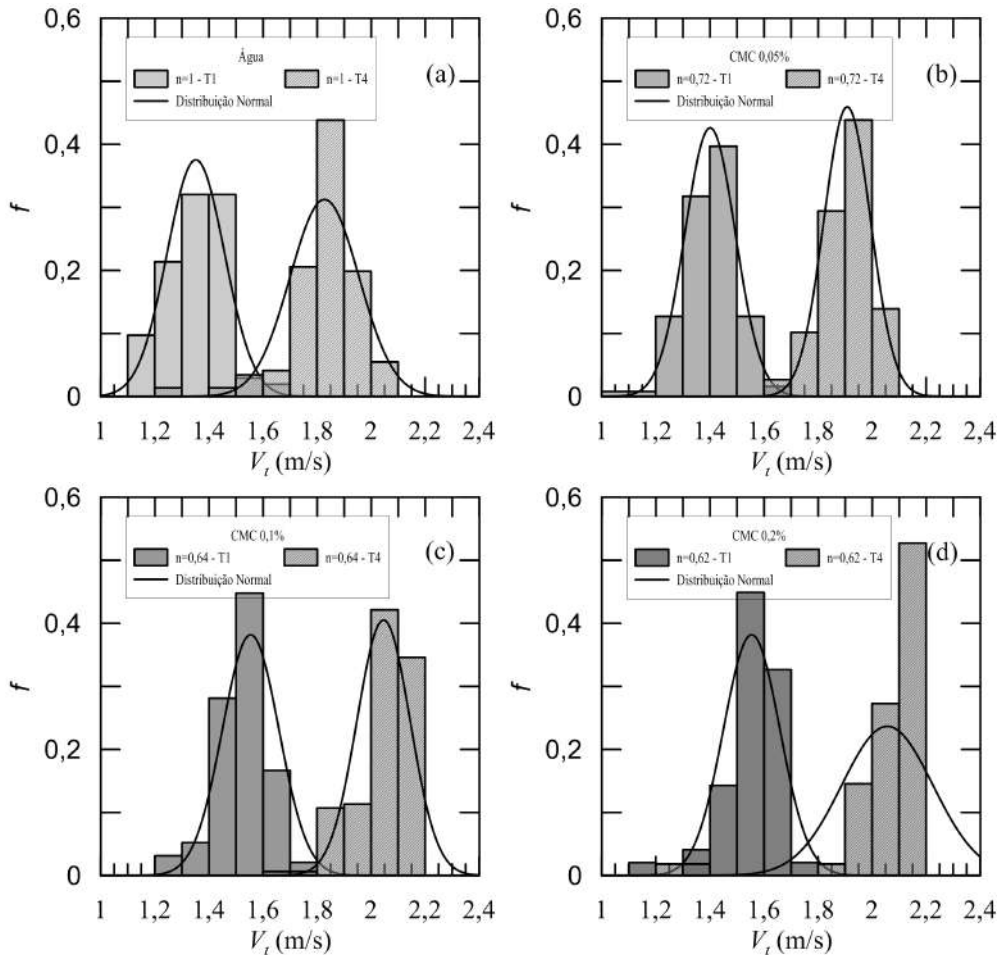


Figura 5.17: Comparação das distribuições de velocidade de translação das bolhas ( $V_t$ ): comparação entre (a) ar-água e (b) ar-solução 0,05% CMC, (c) ar-solução 0,1% CMC, (d) ar-solução 0,2% CMC.

### 5.1.5 Avaliação simultânea em duas estações

Utilizando o sistema com duas câmeras, conforme apresentado na Figura 4.1, foi possível analisar a distribuição de comprimento e velocidade das bolhas simultaneamente em dois pontos distintos da tubulação, distantes 4,5 m um do outro.

A Figura 5.18 apresenta a evolução do quantitativo de bolhas presentes nos escoamento em duas posições distintas. Para a realização destes experimentos, as câmeras foram sincronizadas para capturarem o mesmo conjunto de bolhas, calculando-se o

tempo de deslocamento das bolhas entre as estações 1 e 2, para que as bolhas do início e fim do teste que não passaram pelas duas câmeras, pudessem ser suprimidas. Como se pode observar, ocorre uma ligeira redução do quantitativo de bolhas ao passar da primeira para a segunda estação, da ordem de 4 a 11%. Isto é justificado porque, conforme verificado, as menores bolhas deslocam-se levemente mais lentas que as demais, tendendo a coalescer com as maiores ao longo da tubulação.

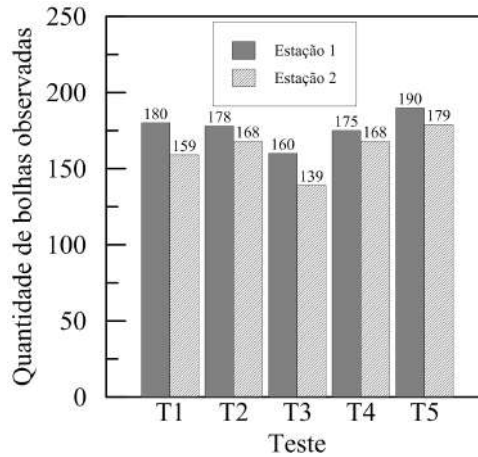


Figura 5.18: Evolução do quantitativo de bolhas ao longo da tubulação, nas estações 1 e 2 do sistema. Solução CMC 0,1%.

A seguir será apresentada uma comparação das distribuições dos comprimentos de bolha e pistão líquido, para o mesmo conjunto de bolhas observado nas estações 1 e 2 simultaneamente. O escoamento apresentado é do fluido com 0,1% de CMC,  $n = 0,64$ .

A Figura 5.19, apresenta as distribuições de comprimentos de bolha e pistão líquido, com  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , variando as 3 vazões de gás, conforme valores da Tabela 5.1, para os testes T1, T2 e T3. Como pode-se observar, ocorre uma ligeira redução do comprimento das bolhas ao longo da tubulação, ao passo que o comprimento do pistão apresenta um pequeno aumento.

O mesmo comportamento do caso anterior pode ser verificado na Figura 5.20, que apresenta as mesmas distribuições para  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$  e as vazões de gás referentes aos testes T4 e T5.

A explicação verificada para este comportamento foi a variação do perfil das bolhas. Foi observado que as bolhas, ao passar pela estação 2, possuíam uma espessura maior que as observadas na estação 1, de perfil mais esguio. Desta forma, observa-se que as bolhas, ao chegarem à estação 2, apesar do menor comprimento, apresentam volume igual ou superior ao da primeira estação, devido à possibilidade de uma bolha coalescência das bolhas.

A Figura 5.21 apresenta as distribuições de velocidade de translação das bolhas, considerando as condições de teste T1 a T5, da Tabela 5.1. Observa-se, nas condições

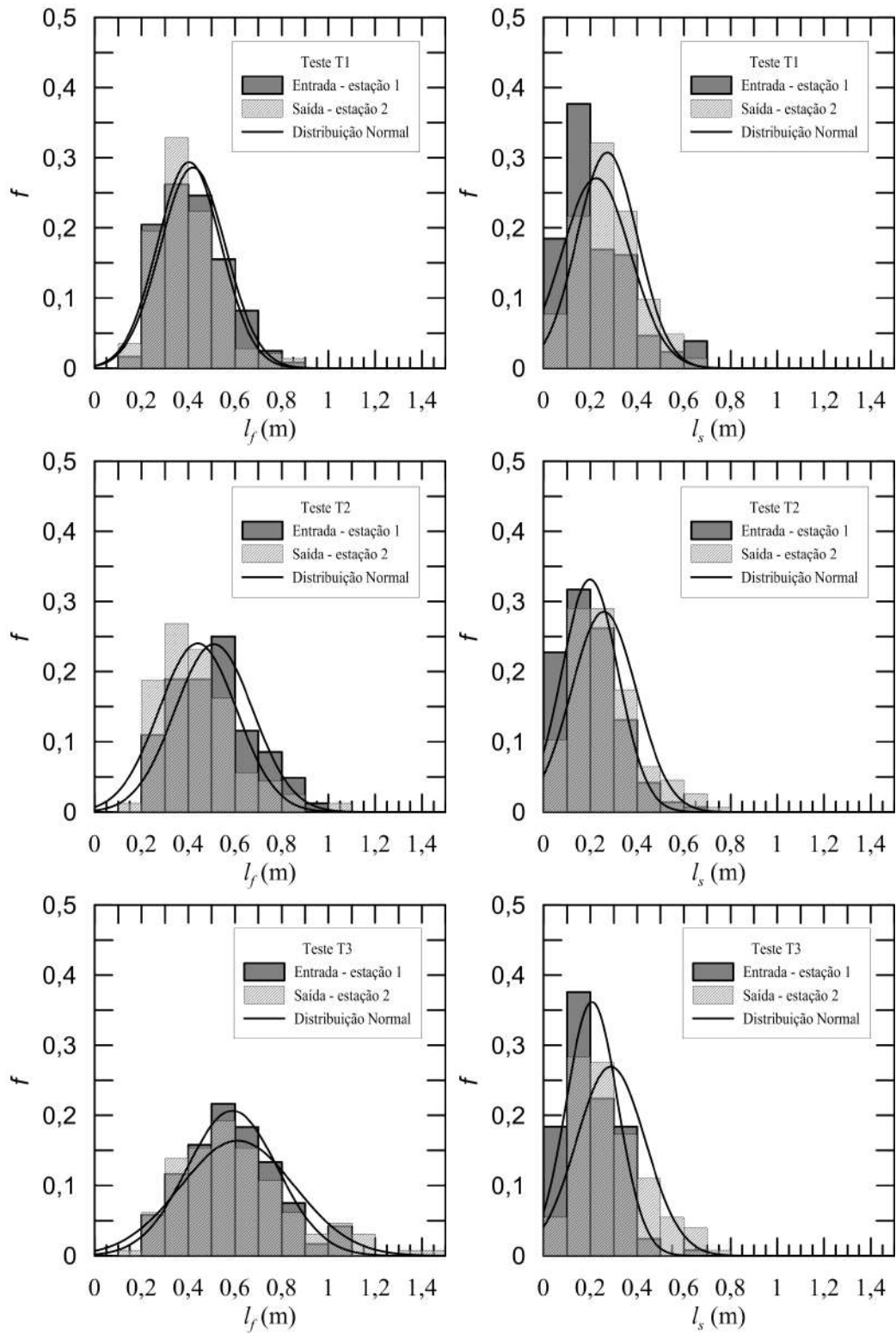


Figura 5.19: Histogramas do comprimento de bolha e pistão líquido para a solução CMC 0,1%,  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ;  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$  (T1),  $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$  (T2) e  $V_{SG} = 0,78 \text{ m/s}$  (T3).

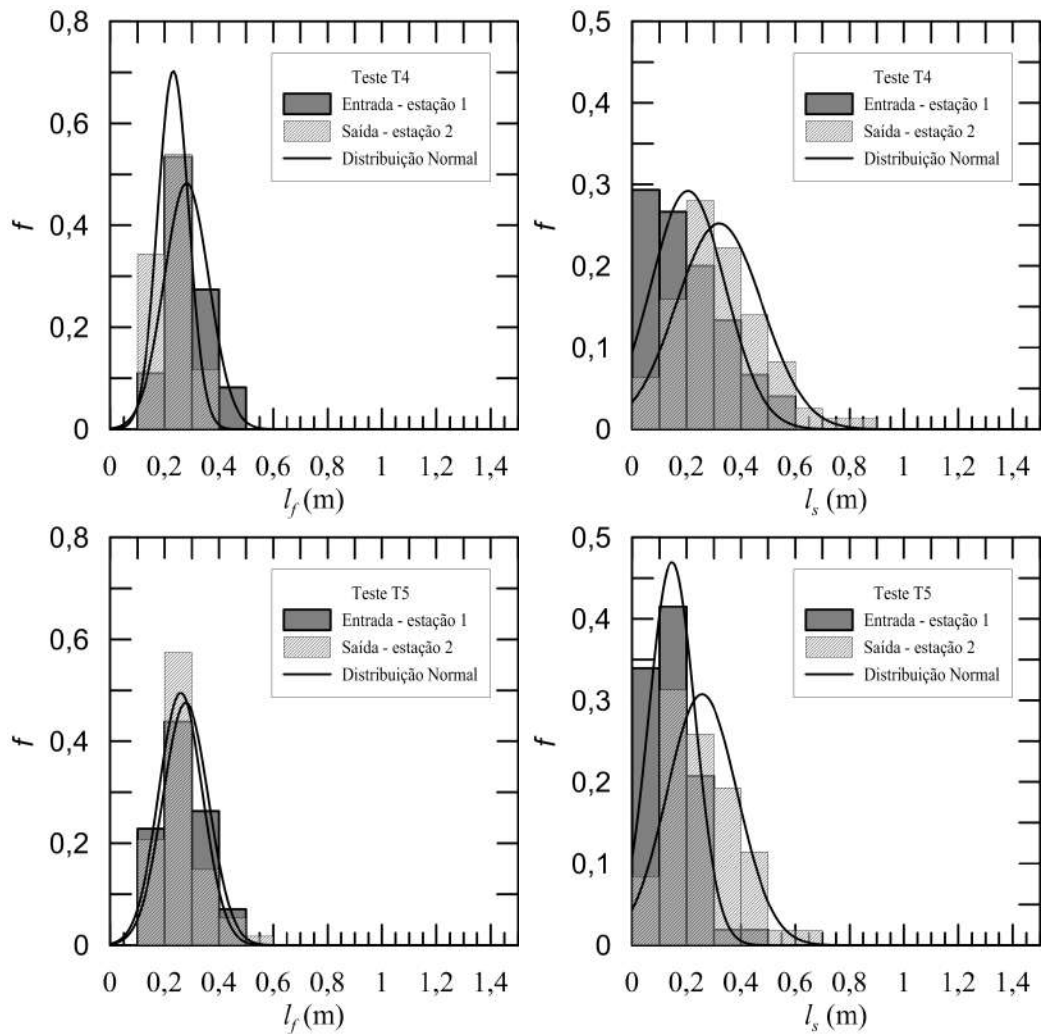


Figura 5.20: Histogramas do comprimento de bolha e pistão líquido para a solução CMC 0,1%,  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ ;  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$  (T4) e  $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$  (T5).

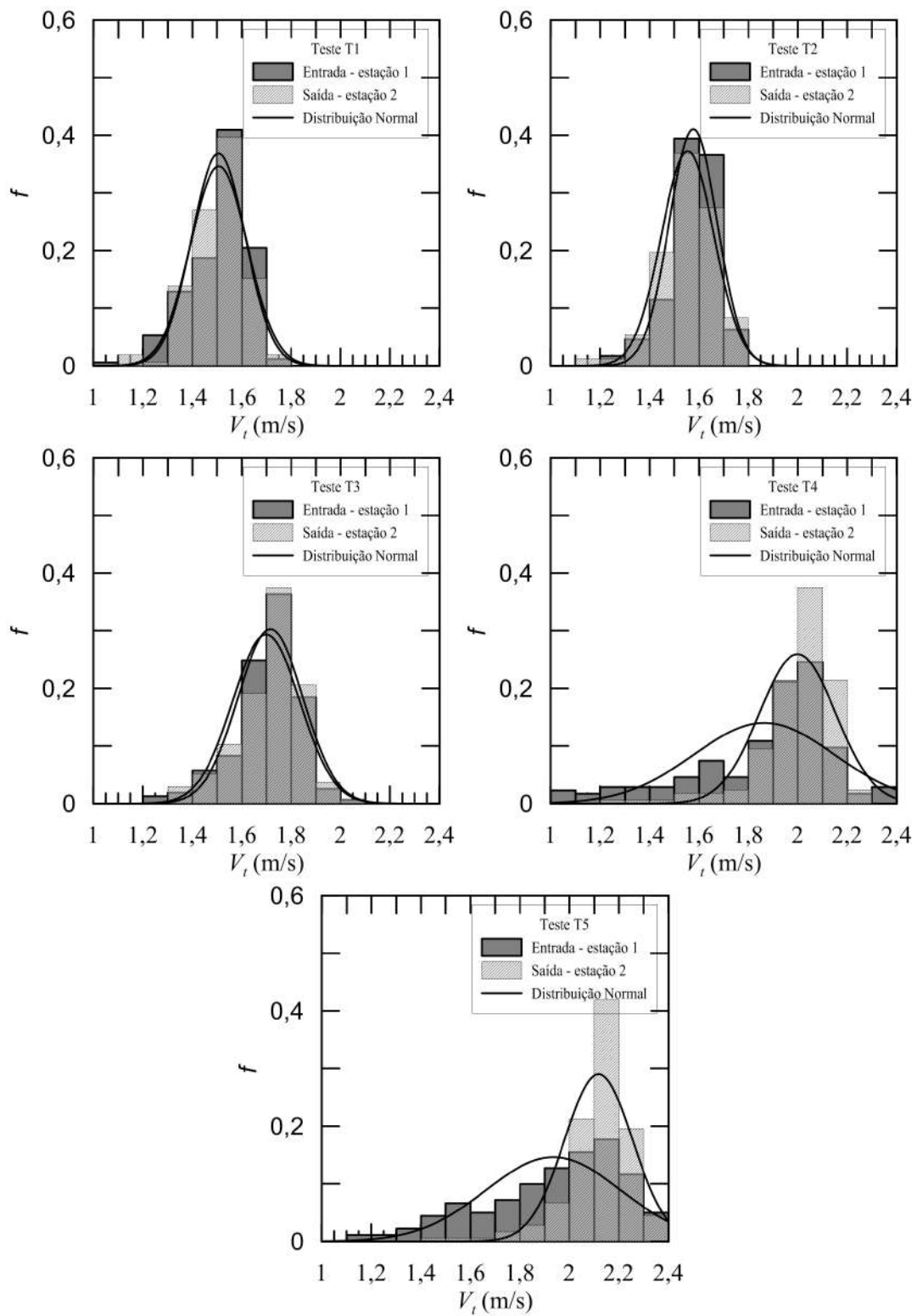


Figura 5.21: Histogramas da velocidade de bolha para a solução CMC 0,1%,  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ;  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$  (T1),  $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$  (T2) e  $V_{SG} = 0,78 \text{ m/s}$  (T3);  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ ;  $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$  (T4),  $V_{SG} = 0,42 \text{ m/s}$  (T5).

de menor vazão (T1 e T2) uma pequena redução nas velocidade das bolhas ao se deslocarem entre as estações 1 e 2. À medida que são aumentadas as vazões de gás (T3) e de líquido (T4 e T5), verifica-se o aumento da velocidade das bolhas. Conforme elucidado anteriormente, as bolhas menores e/ou mais lentas tendem a coalescer com maiores, e à medida que isso ocorre, proporcionam um acréscimo de velocidade nas bolhas. Observa-se, na condição de maior vazão de líquido (T4 e T5), uma presença considerável de bolhas a menor velocidade na estação 1, as quais, em sua grande maioria, são agregadas às de maior velocidade.

## 5.2 Resultados PIV

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir da Velocimetria por Imagem de Partículas. Devido à grande quantidade de bolhas dispersas no escoamento nas condições de teste de maior vazão, a observação e detecção das partículas tornam-se muito restrita. Como o plano de iluminação do laser está localizado verticalmente no meio da seção transversal do tubo e a câmera é posicionada em sua lateral, conforme descrito anteriormente, quando a concentração de bolhas é muito alta, a câmera não consegue visualizar as partículas. Por este motivo, os testes com PIV foram realizados apenas nas condições de teste T1 a T4 da Tabela 5.1, que apresentam menor quantidade de bolhas dispersas.

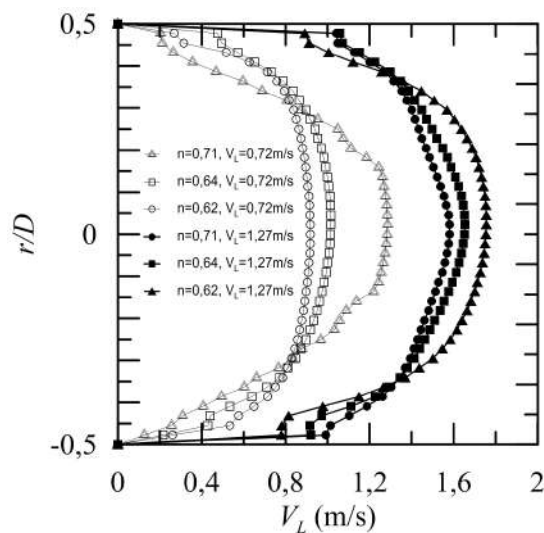


Figura 5.22: Comparação das perfis de velocidade no escoamento de líquido nas concentrações 0,05, 0,1 e 0,2% de CMC,  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ .

A Figura 5.22 apresenta os perfis de velocidade observados no escoamento monofásico para três diferentes concentrações de soluções de CMC, com vazões de líquido de 4 e  $7 \text{ m}^3/\text{h}$ , sendo  $V_L$  a velocidade da fase líquida. Como pode ser observado, a concentração de CMC apresenta grande influência no comportamento das

distribuições de velocidade. Uma atenção especial deve ser dada à solução de 0,2% CMC, onde uma região de velocidade aproximadamente constante aparece no centro do tubo, devido aos efeitos reofluidificantes, e consequente variação de viscosidade. Esta solução também apresenta o menor gradiente de velocidade.

A Figura 5.23 mostra os perfis de velocidade medidos nas regiões de pistão líquido e filme líquido. No gráfico,  $V_L$  representa a velocidade da fase líquida. Como pode ser observado, o pistão representa a parcela mais importante no transporte de massa, visto que a velocidade no filme líquido é consideravelmente reduzida. Além disso, observa-se que os filmes líquidos apresentam aproximadamente a mesma velocidade, porém verifica-se uma importante diferença na altura do filme.

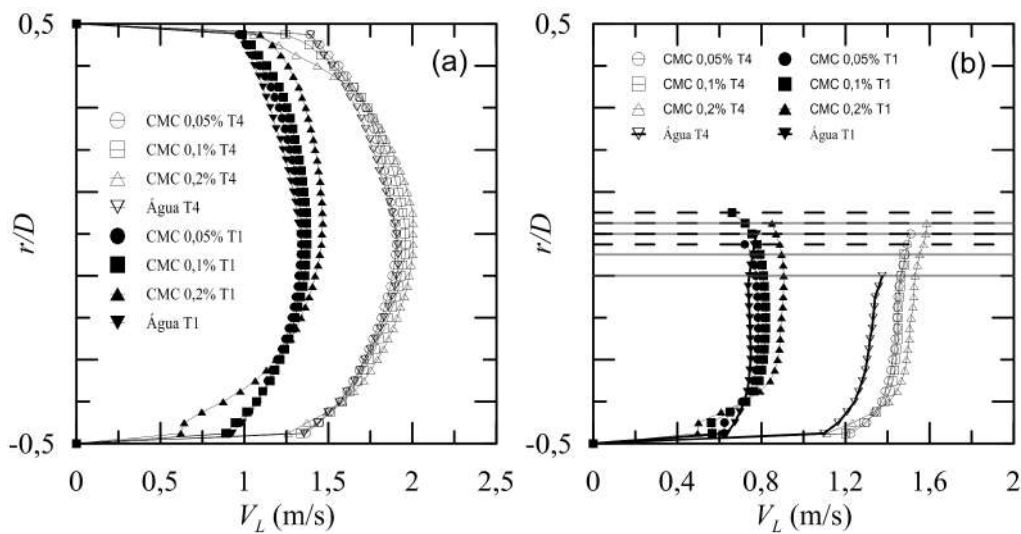


Figura 5.23: Perfis de velocidade no escoamento bifásico nas concentrações 0,05, 0,1 e 0,2% de CMC e água,  $V_{SL} = 0,72m/s$ ,  $V_{SG} = 0,27 m/s$  e  $V_{SL} = 1,27 m/s$ ,  $V_{SG} = 0,22 m/s$ , (a) pistão líquido e (b) filme líquido.

A Figura 5.24 apresenta os perfis de velocidade no filme líquido das bolhas para os 3 fluidos reofluidificantes e para a água, analisados para as condições de teste T1 a T4. Conforme se pode observar, para as variações de vazão de gás, representadas nos testes T1 a T3, a variação na velocidade do filme líquido é muito pequena, para as concentrações de CMC 0,05 (a) e 0,1% (b), e também para a água (d). Observa-se, nestes fluidos de menor viscosidade, que a principal variação ocorre na altura do perfil do filme líquido. Por outro lado, observa-se que para a concentração de CMC 0,2% (c) ocorre um aumento de velocidade do filme, da ordem de 20%, acompanhado de um pequeno aumento do perfil do filme, quando comparado com a água.

Considerando a condição de maior vazão de líquido (T4), observa-se um aumento significativo no filme líquido para os 3 fluidos com CMC, quando comparados à água. Observa-se também um aumento de velocidade na região central do tubo, próxima a bolha, devido à maior velocidade de translação da bolha, conforme visto anteriormente (Figura 5.21).



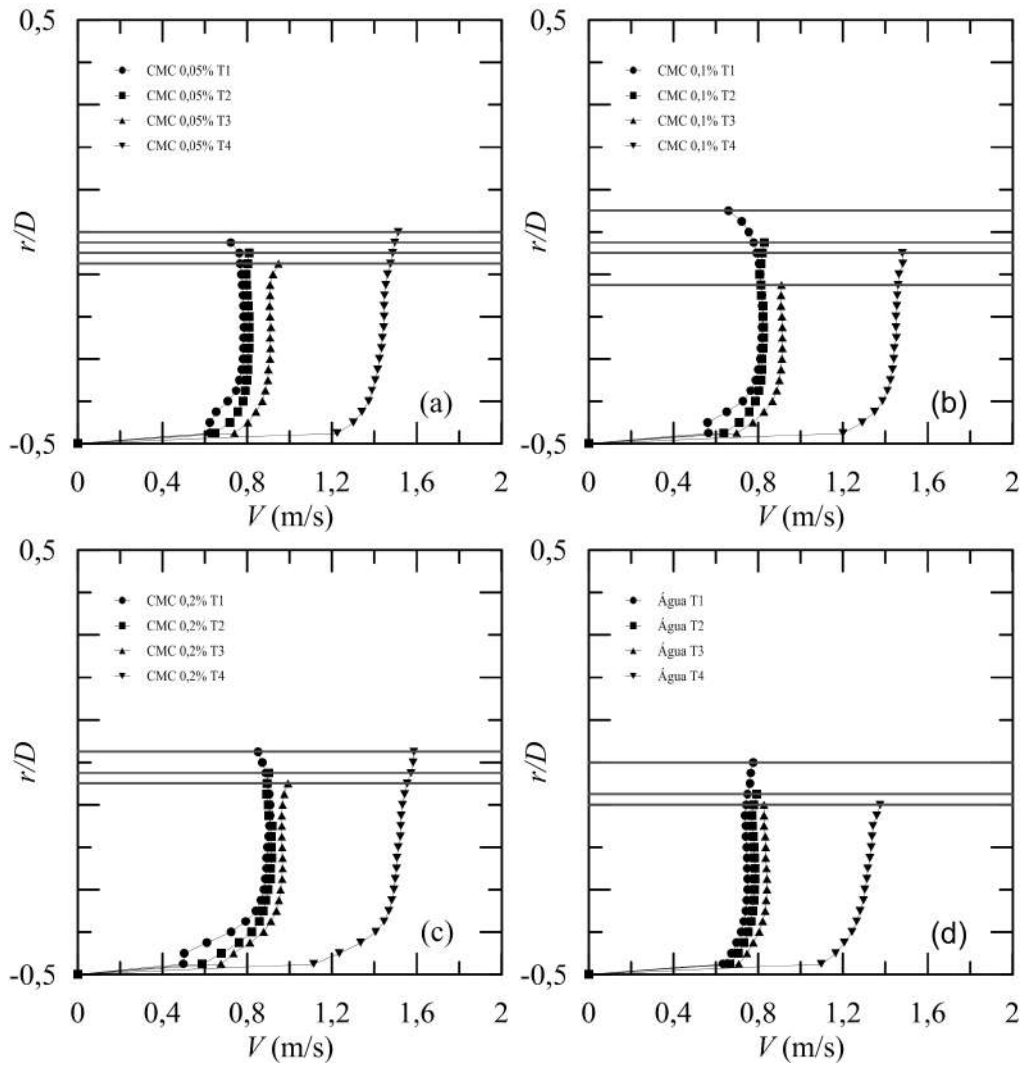


Figura 5.24: Perfis de velocidade no filme líquido para as concentrações de CMC 0,05% (a), 0,1% (b), 0,2% (c) e água (d). Condições de testes conforme Tabela 5.1: T1 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ,  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ ); T2 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ,  $V_{SG} = 0,49 \text{ m/s}$ ); T3 ( $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ ,  $V_{SG} = 0,78 \text{ m/s}$ ); T4 ( $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ ,  $V_{SG} = 0,22 \text{ m/s}$ ).

Conforme mostrado na Figura 5.25, o efeito das propriedades do fluido na velocidade do pistão líquido é menos pronunciado que aquele verificado no escoamento sem bolhas (Figura 5.22). Observa-se, porém, o efeito das perturbações causadas pela presença de bolhas na parte superior da tubulação, que, ao transladarem com velocidade maior que a do líquido, fazem com que o líquido se desloque com maior velocidade na seção superior do tubo. Esta condição é visível principalmente no fluido de maior viscosidade aparente (c). Observa-se também que devido ao escoamento das bolhas, o ponto de maior velocidade ocorre em posição inferior ao centro do duto para a água (d). Por outro lado, para os fluidos reofluidificantes, este efeito do deslocamento das bolhas foi, em parte, compensado pela influência das características reológicas, fazendo com que o ponto de maior velocidade ocorresse mais próximo do centro do duto.

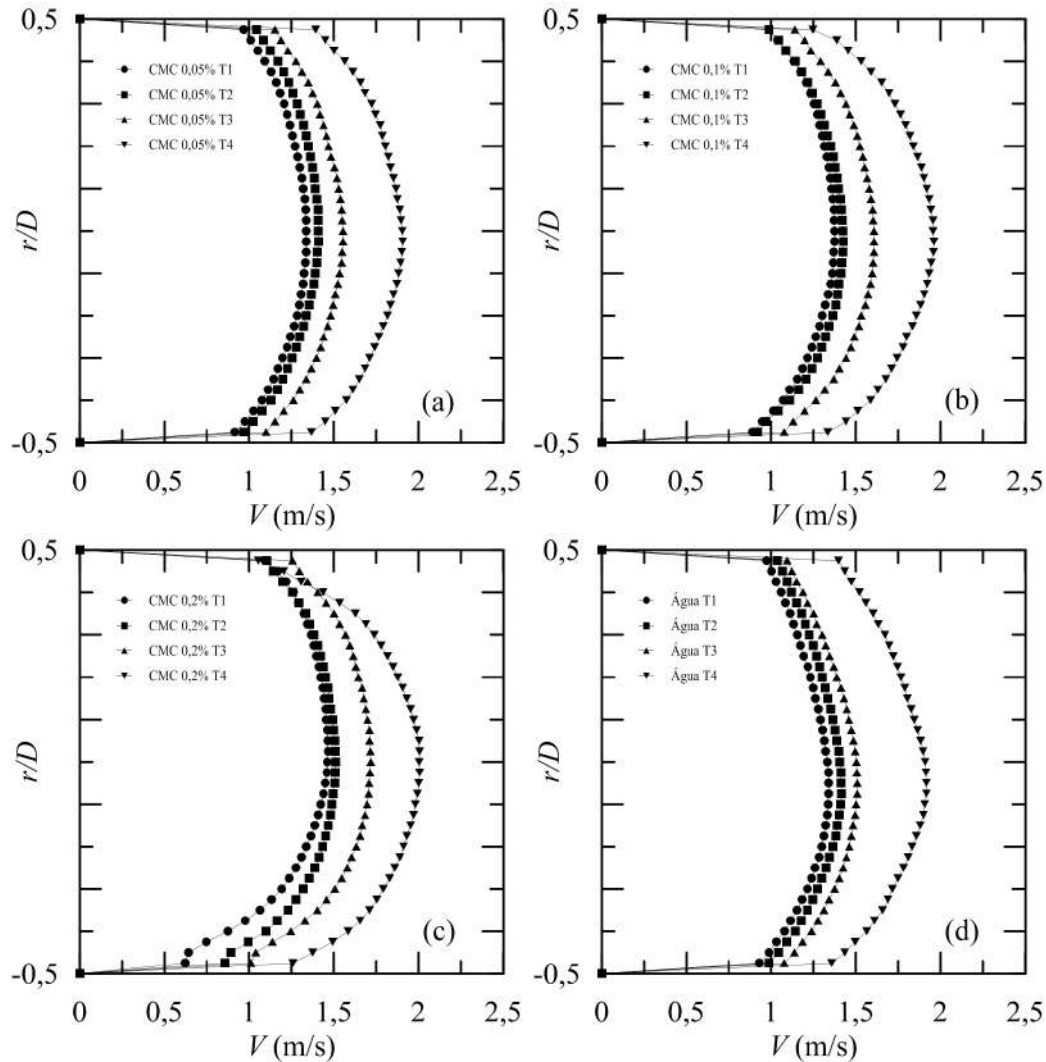


Figura 5.25: Perfis de velocidade no pistão líquido para as concentrações de CMC 0,05% (a), 0,1% (b), 0,2% (c) e água (d). Condições de testes conforme Tabela 5.1: T1 ( $V_{SL} = 0,72$  m/s,  $V_{SG} = 0,27$  m/s); T2 ( $V_{SL} = 0,72$  m/s,  $V_{SG} = 0,49$  m/s); T3 ( $V_{SL} = 0,72$  m/s,  $V_{SG} = 0,78$  m/s); T4 ( $V_{SL} = 1,27$  m/s,  $V_{SG} = 0,22$  m/s).

A figura 5.26 apresenta os perfis de velocidade para 6 diferentes posições ao redor do nariz da bolha para o CMC 0,2%. Como pode ser observado, ocorre uma redução considerável da velocidade do líquido na região que está sendo atravessada pela bolha. O fluido imediatamente à frente da bolha desloca-se com velocidade cerca de 20% acima da verificada no filme líquido.

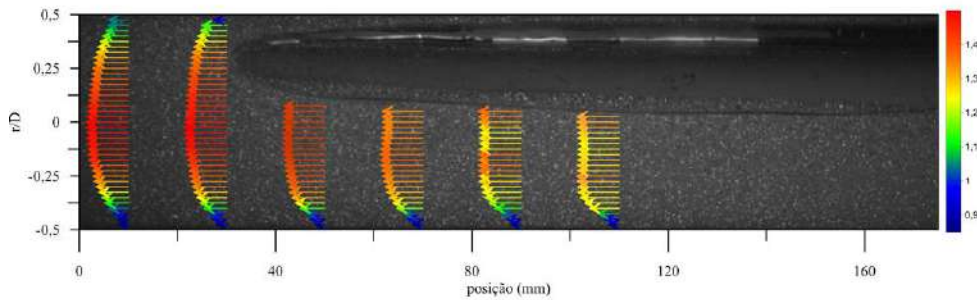


Figura 5.26: Perfis velocidade ao redor do nariz da bolha para o fluido CMC 0,2%,  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ .

A figura 5.27 apresenta os perfis de velocidade para 6 diferentes posições ao redor do nariz da bolha para o CMC 0,1%. Observa-se que, devido a menor viscosidade do fluido com menor concentração de CMC, os perfis de velocidade são mais uniformemente distribuídos, fazendo com que a velocidade máxima no perfil seja inferior ao do CMC 0,2%.

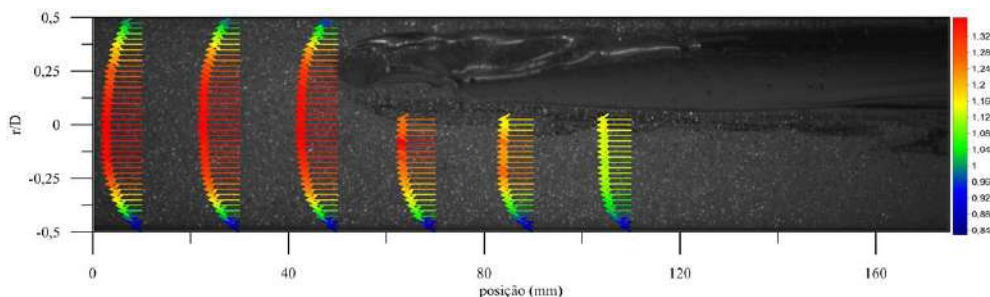


Figura 5.27: Perfis velocidade ao redor do nariz da bolha para o fluido CMC 0,1%,  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ .

As Figuras 5.28 e 5.29 apresentam os mapas de velocidade ao redor da bolha para os fluidos CMC 0,1% e 0,2%, respectivamente, na condição T1 da Tabela 5.1. Para cada condição são mostradas e regiões de interesse no escoamento pistonado: pistão líquido (a), nariz da bolha (b), filme líquido (c) e cauda da bolha (d). Verifica-se claramente a redução de velocidade do líquido na região do filme líquido e sua aceleração imediatamente após a passagem da bolha. Na região do pistão líquido, observa-se a maior velocidade na parte central da tubulação para o CMC 0,2%, enquanto no fluido CMC 0,1%, a velocidade apresenta-se de forma mais homogênea em toda a seção transversal, devido ao menor efeito da viscosidade.

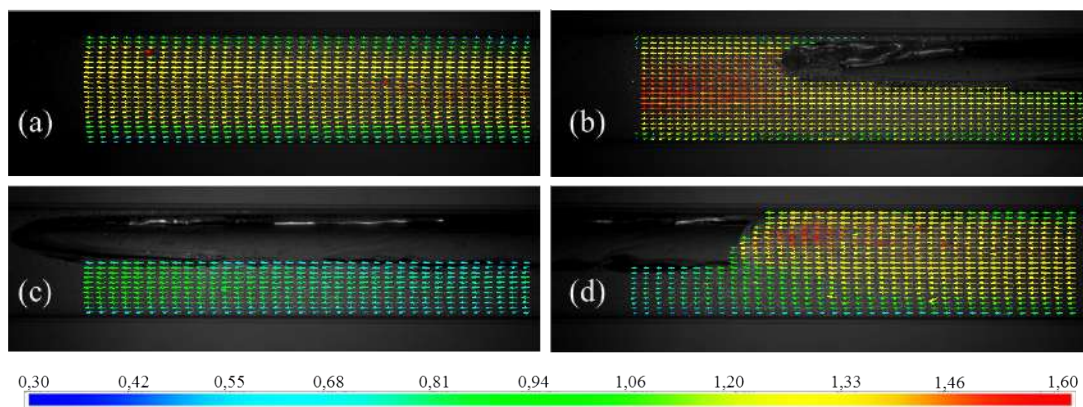


Figura 5.28: Mapa de velocidade ao redor da bolha. CMC 0,1%,  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ : (a) pistão líquido, (b) nariz da bolha, (c) filme líquido e (d) cauda.

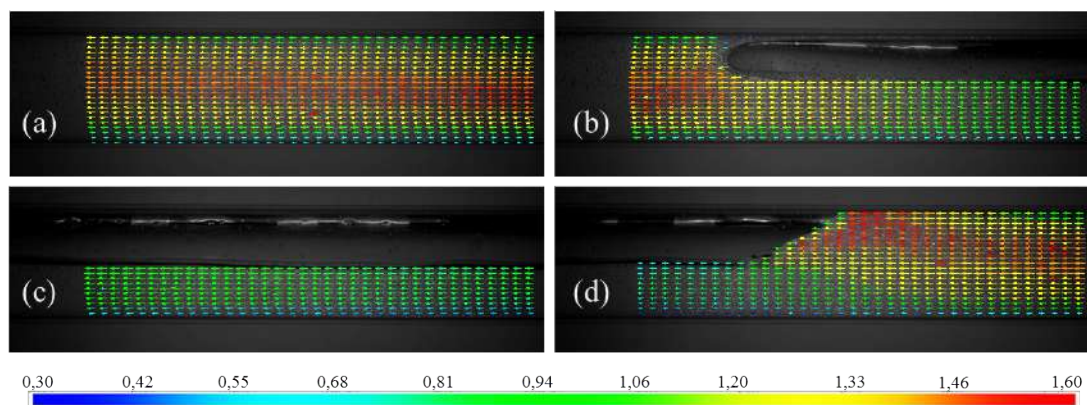


Figura 5.29: Mapa de velocidade ao redor da bolha. CMC 0,2%,  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$  e  $V_{SG} = 0,27 \text{ m/s}$ : (a) pistão líquido, (b) nariz da bolha, (c) filme líquido e (d) cauda.

A Figura 5.30 apresenta os mapas de velocidade da mesmas regiões citadas acima, para o fluido CMC 0,2% na condição T4 da Tabela 5.1. Na comparação com a condição da Figura 5.29, verifica-se que, devido à maior vazão de líquido, a maior  $V_t$  da bolha aumenta a perturbação do escoamento e faz com que a seção de maior velocidade do pistão líquido (a) seja deslocada levemente para baixo, gerando uma região de menor velocidade na parte superior da tubulação, conforme observado na Figura 5.23. No filme líquido, observa-se uma redução progressiva da velocidade, à medida que a bolha avança (b) e (c), para logo em seguida acelerar novamente, após a passagem da bolha (d).

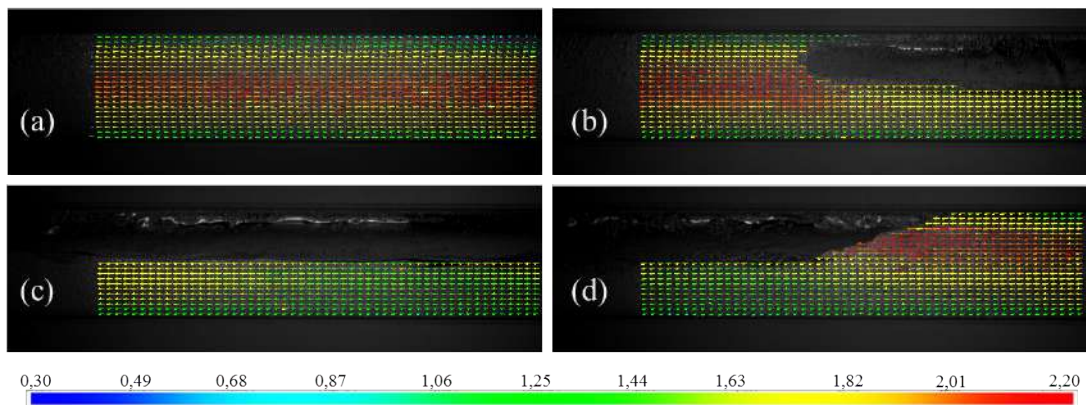


Figura 5.30: Mapa de velocidade ao redor da bolha. CMC 0,2%,  $V_{SL} = 1,27m/s$  e  $V_{SG} = 0,22 m/s$ : (a) pistão líquido, (b) nariz da bolha, (c) filme líquido e (d) cauda.

## 5.3 Comparação com os modelos teóricos

Nesta última etapa, os resultados obtidos foram comparados com os valores provenientes dos modelos teóricos disponíveis na literatura. Foram utilizados os modelos propostos por DUKLER (1975) e ORELL (2005). Para os modelos foi utilizada a correlação para cálculo de frequência proposta por SCHULKES (2011).

### 5.3.1 Perda de carga

A Figura 5.31 apresenta uma comparação dos resultados de queda de pressão experimentais comparados com os calculados pelos modelos, utilizando como dados de entrada as vazões de líquido e gás e frequência de passagem de bolha.

A Tabela 5.4 apresenta os erros relativos médios obtidos com os dois modelos citados acima. Observa-se que o modelo de DUKLER (1975) superestima a perda de carga, mesmo para o caso do fluido newtoniano. O modelo de ORELL (2005), por outro lado, apresenta boa coerência com os dados experimentais, estimando as quedas de pressão para a água com erros abaixo de 5% para os dados experimentais

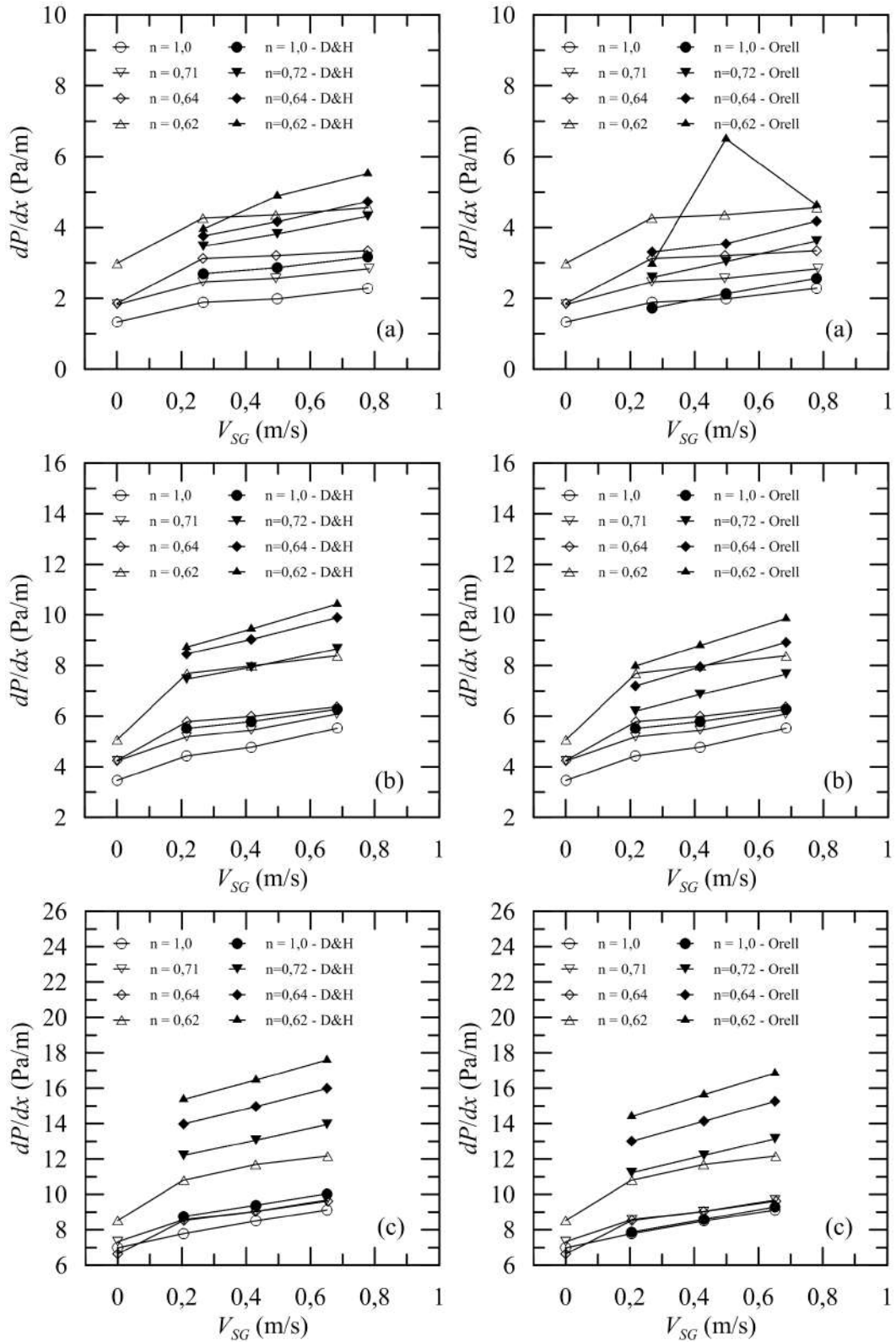


Figura 5.31: Comparação dos resultados experimentais de perda de carga com os modelos de DUKLER (1975) (esquerda) e ORELL (2005) (direita), para água e três fluidos refluidificantes testados: (a)  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , (b)  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , (c)  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$

obtidos. Também para os fluidos reofluidificantes o modelo apresentou resultados satisfatórios, principalmente a baixas vazões de líquido. Em altas vazões ambos os modelos apresentaram grande discrepância para os dados experimentais.

Dukler (1975)				
$V_{SL}$ (m/s)	n = 1,0	n = 0,71	n = 0,64	n = 0,62
0,72	-41,94%	-47,26%	-30,63%	-8,69%
1,27	-19,73%	-43,96%	-50,71%	-18,66%
1,81	-10,90%	-43,65%	-65,27%	-42,50%
Orell (2005)				
$V_{SL}$ (m/s)	n = 1,0	n = 0,71	n = 0,64	n = 0,62
0,72	-3,59%	-17,01%	-13,77%	-6,78%
1,27	2,90%	-23,71%	-32,31%	-10,40%
1,81	-1,29%	-33,91%	-55,87%	-35,11%

Tabela 5.4: Média dos erros nas perdas de carga calculadas pelos modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005).

Dukler (1975)				
$V_{SL}$ (m/s)	n = 1,0	n = 0,71	n = 0,64	n = 0,62
0,72	-41,69%	-33,87%	-18,34%	-2,41%
1,27	-17,44%	-25,00%	-30,24%	-4,83%
1,81	-6,99%	-19,35%	-36,05%	-20,40%
Orell (2005)				
$V_{SL}$ (m/s)	n = 1,0	n = 0,71	n = 0,64	n = 0,62
0,72	1,31%	-2,77%	-8,51%	2,45%
1,27	4,99%	-5,13%	-12,39%	3,10%
1,81	1,63%	-11,06%	-28,17%	-14,62%

Tabela 5.5: Média dos erros nas perdas de carga calculadas pelos modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005) considerando o fator de atrito para fluido não-newtoniano.

A Figura 5.32 apresenta a mesma comparação dos resultados de queda de pressão experimentais comparados com os valores calculados pelos modelos nos casos anteriores (Figura 5.31), porém desta vez considerando também os efeitos da reologia do fluido, conforme modelo descrito no capítulo anterior.

Uma comparação entre os dados apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5 evidencia que a formulação do fator de atrito para fluido não newtoniano proposta por ANBARLOOEI (2015) e adaptada aos modelos apresenta boa concordância com os resultados experimentais obtidos, apesar de ainda prever uma perda de carga superior ao caso real. As diferenças mais significativas encontradas foram nas maiores vazões. Novamente observa-se que o modelo de ORELL (2005) mostrou-se mais eficiente na predição da perda de carga.

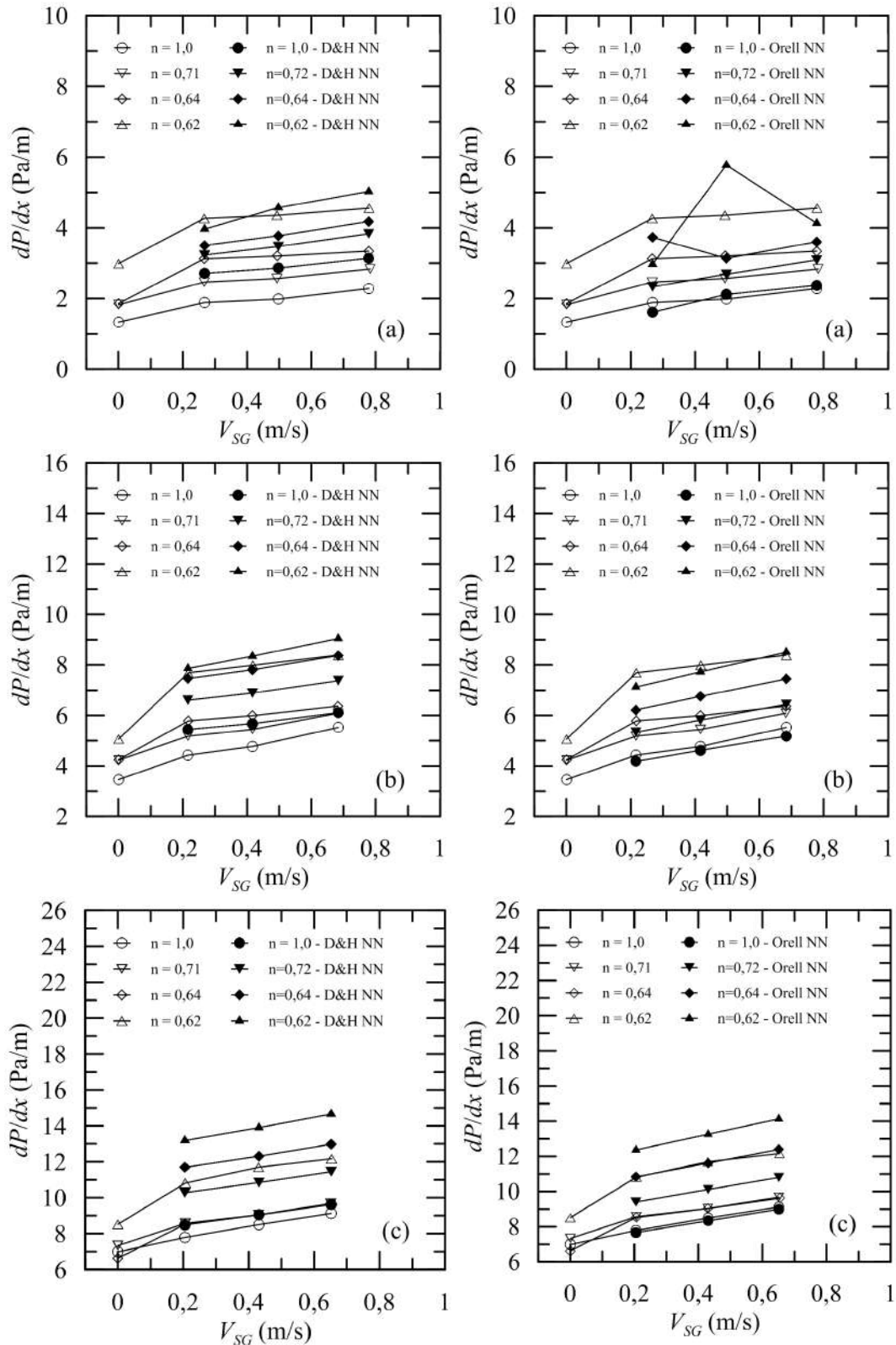


Figura 5.32: Comparação dos resultados experimentais de perda de carga com os modelos de DUKLER (1975) (esquerda) e ORELL (2005) (direita), adaptados aos efeitos da reologia, para água e os três fluidos refluidificantes testados: (a)  $V_{SL} = 0,72 \text{ m/s}$ , (b)  $V_{SL} = 1,27 \text{ m/s}$ , (c)  $V_{SL} = 1,81 \text{ m/s}$ .



### 5.3.2 Comprimento de bolha

A Figura 5.33 mostra uma comparação entre os resultados experimentais para os comprimentos de bolha com os modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005). Pode-se observar que o modelo de Orell mostrou-se mais eficiente para prever o comprimento de bolha, enquanto o modelo de Dukler apresentou erros consideráveis principalmente na menor vazão de líquido.

Dukler (1975)				
$l_u$ (m/s)	n = 1,0	n = 0,71	n = 0,64	n = 0,62
0,72	-22,24%	-45,41%	-177,49%	-113,96%
1,27	-77,47%	-80,15%	-97,00%	-176,59%
1,81	-89,84%	-89,82%	-60,13%	-46,25%
Orell (2005)				
$l_u$ (m/s)	n = 1,0	n = 0,71	n = 0,64	n = 0,62
0,72	-32,30%	-32,26%	-17,25%	-7,63%
1,27	-28,95%	-27,88%	-23,57%	-16,27%
1,81	-33,84%	-37,18%	-22,10%	-5,85%

Tabela 5.6: Média dos erros nos comprimentos unitários calculadas pelos modelos de DUKLER (1975) e ORELL (2005).

De forma semelhante à comparação da perda de carga, observa-se na Tabela 5.6 que o modelo de Dukler superestima o comprimento unitário, mostrado na Figura 5.34, em todas as condições avaliadas, apresentando diferenças consideráveis para os valores experimentais. O modelo de Orell, contudo, mostrou-se mais eficaz no cálculo dos comprimentos, mantendo o erro abaixo de 30% para a maioria das condições.

Vale ressaltar que mesmo para o fluido newtoniano (água), mostrado na Figura 5.35, as diferenças entre os valores reais e os estimados pelos modelos foram da mesma ordem de grandeza que os obtidos com os fluidos a base de CMC e os modelos adaptados à reologia do fluido.

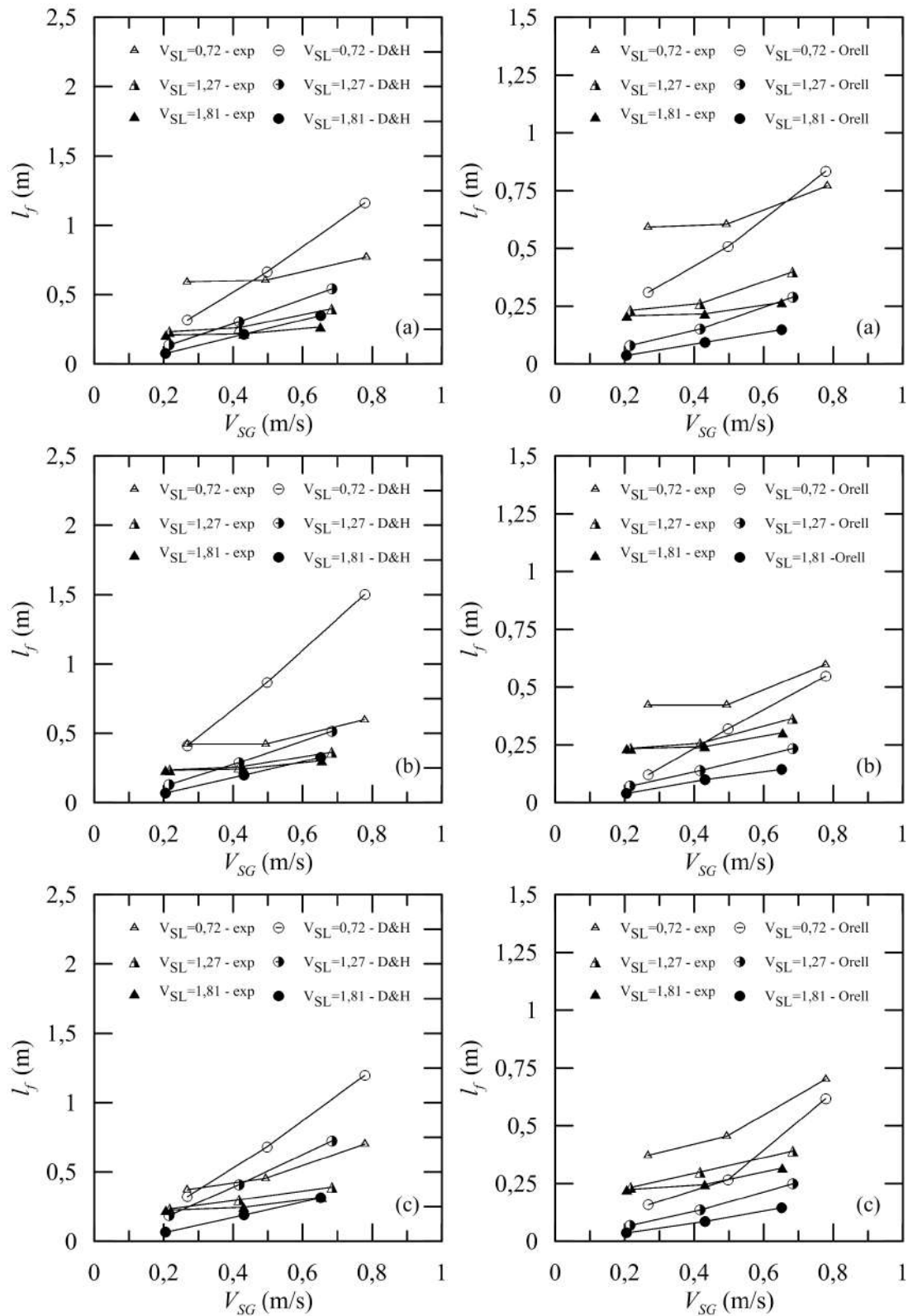


Figura 5.33: Comparação dos resultados experimentais de comprimento de bolha com o modelo de Dukler (esquerda) e Orell (direita) para os três fluidos refluidificantes testados: (a) CMC 0,05%:  $n = 0,71$ , (b) CMC 0,1%:  $n = 0,64$ , (c) CMC 0,2%:  $n = 0,62$ .

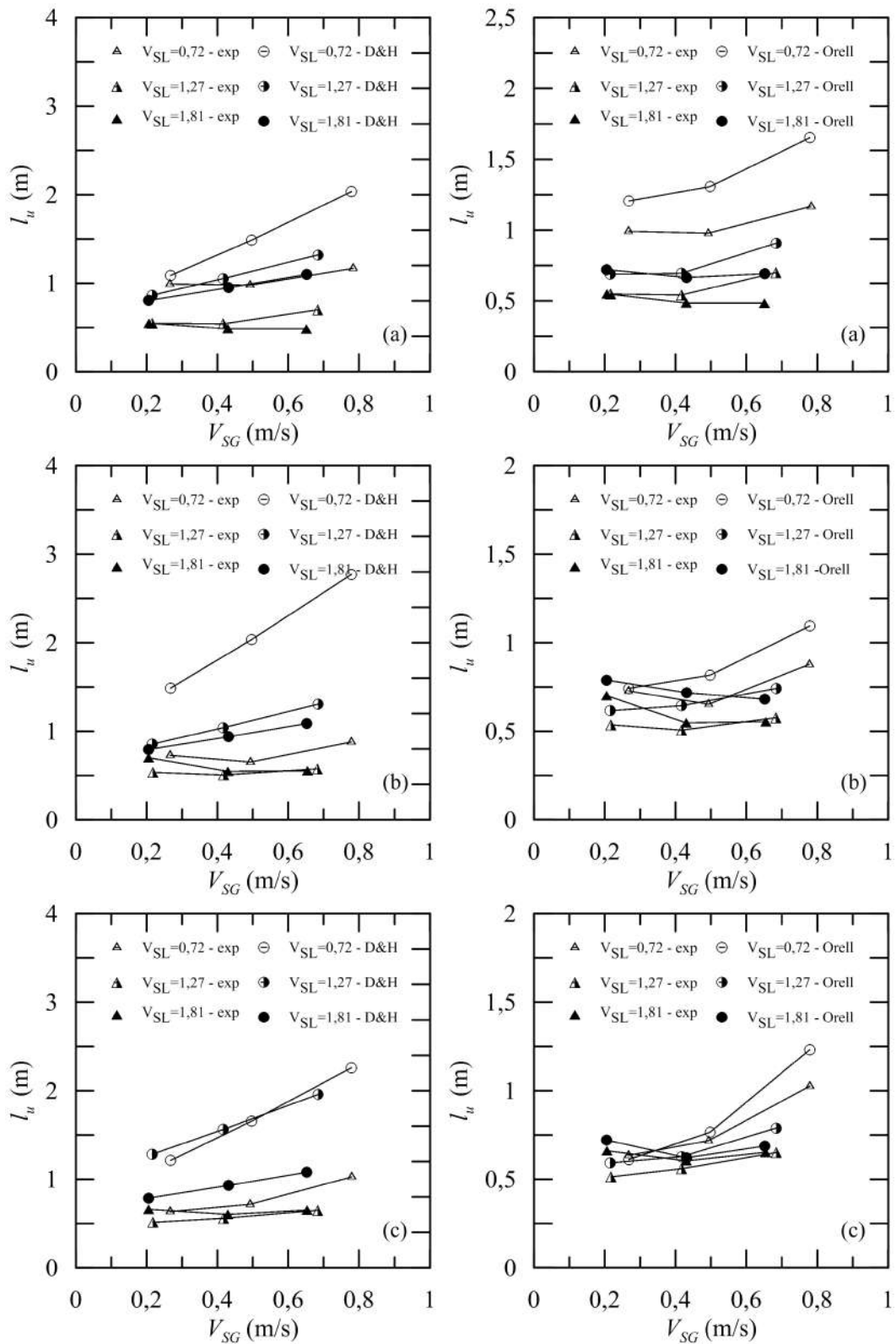


Figura 5.34: Comparação dos resultados experimentais de comprimento unitário com o modelo de Dukler (esquerda) e Orell (direita) para os três fluidos refluidificantes testados: (a) CMC 0,05%:  $n = 0,71$ , (b) CMC 0,1%:  $n = 0,64$ , (c) CMC 0,2%:  $n = 0,62$ .

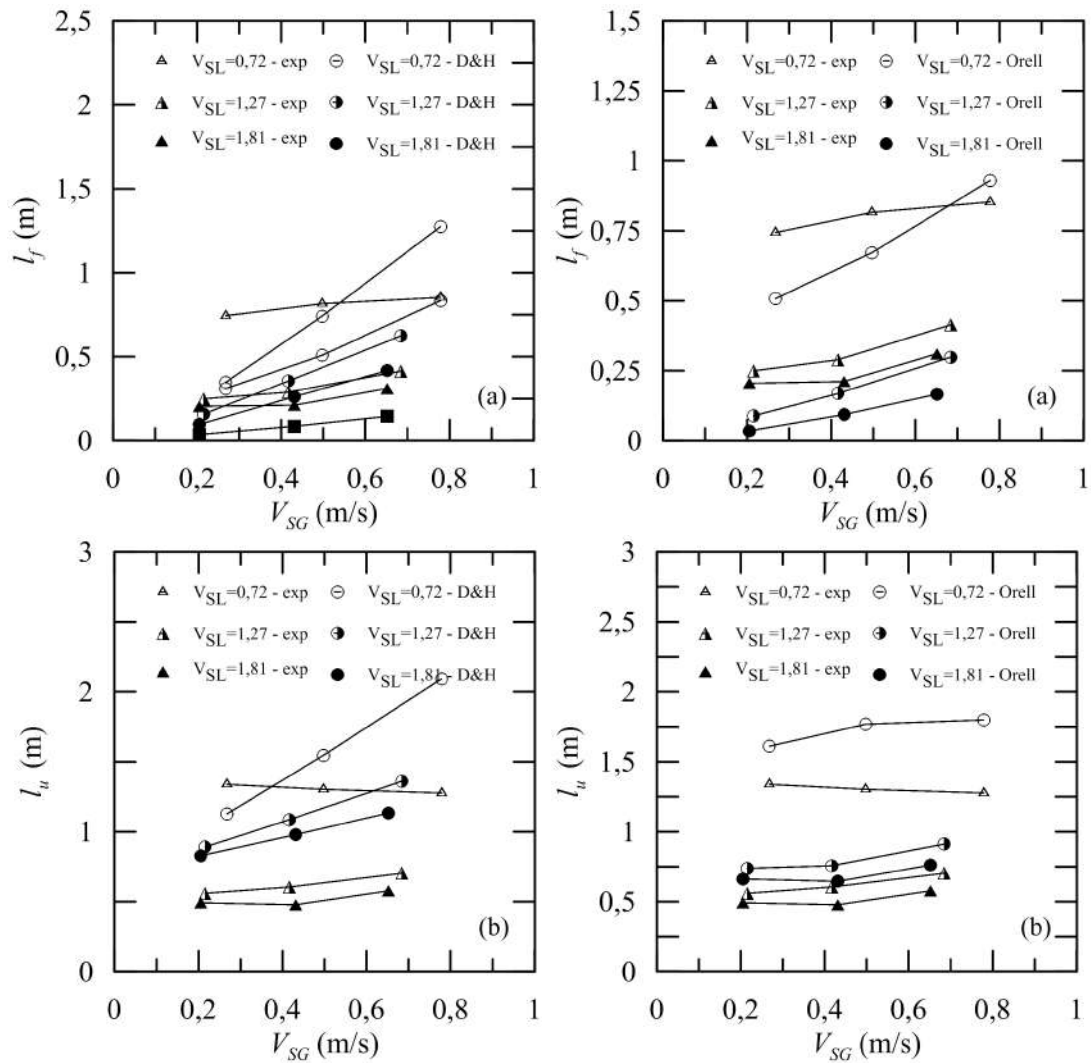


Figura 5.35: Comparação dos resultados experimentais com os modelos de Dukler (esquerda) e Orell (direita) para água: (a) comprimento de bolha e (b) comprimento unitário.

# Capítulo 6

## Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo analisar o comportamento de escoamentos bifásicos de fluidos reofluidificantes em tubulações horizontais submetidos a variadas condições de vazão. A revisão bibliográfica realizada revelou que diversos estudos trataram extensivamente o escoamento pistonado de fluidos newtonianos, porém ainda é restrita a abrangência de estudos que levem em conta a utilização de líquidos com comportamento não newtoniano e em especial para fluidos reofluidificantes.

Os efeitos da reologia do fluido sobre as propriedades do escoamento foram analisados através de inúmeros experimentos, mostrando importantes alterações nas características do escoamento. Os fluidos obtidos a partir da adição de CMC à água, mesmo em pequenas concentrações, apresentaram alto grau de aeração na fase contínua do líquido, devido à maior resistência do fluido ao deslocamento e coalescência das bolhas menores.

Os efeitos mais significativos das alterações nas propriedades do fluido foram observados na perda de carga medida no escoamento pela tubulação. Na menor velocidade superficial de líquido testada, mesmo a menor concentração de CMC causou um acréscimo de perda de carga da ordem de 30%. Para maiores concentrações, a diferença chegou a 126%. O efeito das características do fluido pode ser observado no aumento da vazão de líquido, que aumenta o cisalhamento no mesmo e provoca a redução de sua resistência ao escoamento. À medida que o fluido acelera, a diferença na perda de carga diminui, tendendo a se igualar a da água ao atingir a maior vazão de líquido. Não foi possível testar vazões de líquido superiores às apresentadas devido à baixa resistência à pressão da tubulação de acrílico utilizada.

Os comprimentos de bolha, pistão líquido e célula unitária mostraram-se altamente sensíveis a redução do  $n$  do fluido, principalmente na menor vazão de líquido. Com o aumento da vazão, a redução de viscosidade aparente faz com que os comprimentos de bolhas sejam mais próximos aos da água. Os comprimentos de pistão líquido, porém, mostraram maiores alterações, apresentando dimensões inferiores às do fluido newtoniano para baixas vazões e, à medida que a velocidade do líquido

aumenta,  $l_s$  apresenta-se até 60% superior ao da água, devido à alta concentração de pequenas bolhas dispersas no fluido reofluidificante, característica que não é observada na água.

Verificou-se também que os escoamentos pistonados apresentam grande variabilidade nos comprimentos de bolha e pistão líquido para cada condição de escoamento, e que quanto maior a vazão de gás maior é a faixa de distribuição destes valores.

A velocidade de translação das bolhas nos fluidos reofluidificantes apresentou alterações menores que as observadas nas outras características do escoamento. O aumento de velocidade mais significativo ocorreu para os fluidos com maior concentração de CMC ( $n = 0,62$  e  $0,64$ ), chegando a 22%. O aumento pode ser explicado pelo aumento da frequência de bolhas e pela diminuição do comprimento unitário.

A frequência de passagem de bolhas depende fundamentalmente da velocidade superficial do líquido, sendo pouco influenciada pela variação da velocidade superficial do gás. Por outro lado, as alterações na reologia do fluido mostraram grande influência na frequência, principalmente nas maiores vazões. Devido à maior concentração de CMC e conseqüente diminuição do  $n$  do fluido, ocorre um aumento significativo na frequência de bolhas.

Os resultados dos testes utilizando PIV mostraram que o pistão representa a parcela mais importante no transporte de massa, visto que a velocidade no filme líquido é consideravelmente reduzida em relação a este. Observou-se também que, para uma mesma condição de escoamento, os filmes líquidos apresentam aproximadamente a mesma velocidade independente do fluido utilizado, porém foi verificada uma importante diferença na altura do filme.

Para as maiores vazões de líquido, observou-se que a maior velocidade de translação da bolha aumenta a perturbação do escoamento e faz com que a seção de maior velocidade do pistão líquido seja deslocada levemente para baixo, gerando uma região de menor velocidade na parte superior da tubulação.

A comparação dos dados experimentais de queda de pressão com os modelos teóricos apresentou uma aproximação satisfatória, tanto dos modelos base para o fluido newtoniano, quanto dos modelos adaptados para considerar os efeitos reológicos dos fluidos não newtonianos. Dentre os modelos testados, o de ORELL (2005) foi o que se mostrou mais eficiente.

Também na comparação dos comprimentos, o modelo de ORELL (2005) foi o que apresentou melhores resultados, mantendo o erro abaixo de 30% para a maioria das condições, mesma ordem de grandeza que foi obtida para as comparações com o fluido newtoniano.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Algumas sugestões para trabalhos futuros são:

-Realizar testes com os mesmos fluidos utilizando maiores vazões de líquido, para constatar a possibilidade de redução de perda de carga, quando comparado ao escoamento de fluido newtoniano.

-Quantificar as bolhas dispersas na fase líquida, avaliando as frações de gás e líquido presentes nesta fase.

-Estudar o escoamento dos fluidos reofluidificantes utilizando outros diâmetros de tubulação para verificar a aplicabilidade dos resultados aqui obtidos.

-Analisar as interações da interface líquido/gás e os efeitos da reologia do fluido na coalescência das pequenas bolhas.

# Referências Bibliográficas

- ADRIAN, R. J., 1991, “Particle Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics”, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, v. 23, pp. 261–304.
- ANBARLOOEI, H.R.; CRUZ; D.O.A., R. F. S. F. A., 2015, “Phenomenological Blasius-type friction equation for turbulent power-law fluid flows”, *Physical Review E - Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics*, v. 92, n. 6, pp. 5–9.
- ANDREUSSI, P; BENKINSEN, K. N. O., 1993, “Void distribution in slug flow”, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 19, pp. 817–828.
- BANDEIRA, F.J.S.; GONÇALVES, G. L. J. S. F. A., 2016, “Characterization of Inclined Gas Jets in Two-Phase Crossflow”, *Flow, Turbulence and Combustion*.
- BARNEA, D; TAITEL, Y., 1993, “A model for slug length distribution on gas-liquid slug flow”, *Int. J. Multiphase Flow*, pp. 829–838.
- BEATTIE, D. R. H; WHEALLEY, P. B., 1982, “A simple two-phase frictional pressure drop calculation method”, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 8, pp. 83–87.
- BRUMMER, R., 2006, *Rheology Essentials of Cosmetics and Food Emulsions*. Springer, New York.
- CHHABRA, R.P; RICHARDSON, J., 2008, *Non newtonian flow and applied rheology*. I. Chem. E.
- COOK, M; NEWTON, C. B. M., 1995, “Experimental investigation of air-water flow in horizontal pipes and comparison with existing models”, *Twelfth Australasian Fluid Mechanics Conference*, v. 55, pp. 699–702.
- COOK, M; BEHNIA, M., 2000, “Slug length prediction in near horizontal gas-liquid intermittent flow”, *Chemical Engineering Science*, v. 55, pp. 2009–2018.



- DUKLER, A. E; MARON, D. B. N., 1985, “A physical model for predicting the minimum stable slug length”, *Chemical Engineering Science*, v. 40, pp. 1379–1385.
- DUKLER, A.E; HUBBARD, M., 1975, “A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes”, *Industry and Engineering Chemical Fundamentals*, v. 4, pp. 4.
- DZIUBINSKI, M; FIDOS, H., 2004, “The flow pattern map of a two-phase non-Newtonian liquid-gas flow in the vertical pipe”, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 30, pp. 551–563.
- GOVIER, G.W; AZIZ, K., 1977, *The flow of complex mixtures in pipes*. Robert E. Krieger.
- HART, J; HAMERSMA, P. J. F. M. H., 1989, “Correlations predicting frictional pressure drop and liquid holdup during horizontal gas-liquid pipe flow with a small liquid holdup”, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 15, pp. 947–964.
- HEYWOOD, N.Y; RICHARDSON, J., 1979, “Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: determination of liquid holdup by gamma-ray absorption”, *Chemical Engineering Science*, v. 34, pp. 17–30.
- HOUT, R. V; BARNEA, D. S. L., 2002, “Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow”, *Int. J. Multiphase Flow*, v. 28, pp. 1333–1350.
- JIA, N; GOURMA, M. T. C., 2011, “Non-Newtonian multi-phase flows: On drag reduction, pressure drop and liquid wall friction factor”, *Chemical Engineering Science*, v. 66, pp. 4742–4756.
- KAWAGUCHI, Y; SEGAWA, T. F. Z. L. P., 2002, “Experimental study on drag-reducing channel flow with surfactant additives-spatial structure of turbulence investigated by PIV system”, *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, v. 28, pp. 1333–1350.
- LI, H; WONGA, T. N. S. M. D. F., 2014, “Non-Newtonian two-phase stratified flow with curved interface through horizontal and inclined pipes”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 74, pp. 113–120.
- LOCKHART, R.W; MATINELLI, R., 1945, “Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes”, *Chemical Engineering Progress*, v. 45, pp. 1.

- MAGALHÃES, G.R; GONCALVES, G. L. J. S. F. A., 2013, “An Experimental investigation of the effects of gas solubility on the properties of horizontal slug flow”, *Int. J. Multiphase FLOW*, pp. 33–40.
- MANDHANE, J. M; GREGORY, G. A. A. K., 1974, “A flow pattern map for gas liquid flow in horizontal pipes”, *Int. J. Multiphase FLOW*, v. 1, pp. 537–553.
- MARON, D. M; YACOUB, N. B. N., 1982, “New thoughts on the mechanism of gas-liquid slug flow”, *Letters in heat and mass transfer*, v. 9, pp. 333–342.
- MATAMOROS, L.M.C; LOUREIRO, J. S. F. A., 2014, “Length-area-volume of long bubbles in horizontal slug flow”, *Int. J. Multiphase FLOW*, v. 65, pp. 24–30.
- METZNER, A.B; REED, J., 1955, “Flow of Non-Newtonian Fluids – Correlation of the Laminar, Transition and Turbulent flow regions”, *A.I.Ch.E. Journal*, v. 1, pp. 434.
- MULLER-STEINHAGEN, H; HECK, K., 1986, “A simple pressure drop correlation for two-phase flow in pipes”, *Chemical Engineering Science*, v. 20, pp. 297–308.
- NICHOLSON, M.K; AZIZ, K. G. G., 1978, “Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models”, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 56, pp. 653–663.
- NOGUEIRA, S; PINTO, F. R. M. C. L., 2003, “Simultaneous PIV and pulsed shadow technique in slug flow a solution for optical problems”, *Experiments in Fluids*, v. 35, pp. 598–609.
- ORELL, A., 2005, “Experimental validation of a simple model for gas-liquid slug flow in horizontal pipes”, *Chemical Engineering Science*, v. 60, pp. 1371–1381.
- PEREIRA, A. S; PINHO, F. T., 2000, “Turbulent characteristics of shear-thinning fluids in recirculating flows”, *Experiments in Fluids*, v. 28, pp. 266–278.
- PEREIRA, A.S; PINHO, F., 2002, “Turbulent pipe flow of thixotropic fluids”, *Int. J. of Heat and Fluid FLOW*, v. 23, pp. 36–51.
- PICCHI, D.; MANERBA, Y. C. S. M. M. P. P., 2015, “Gas/shear-thinning liquid flows through pipes: Modeling and experiments”, *Int. J. Multiphase FLOW*, v. 73, pp. 217–226.

- PINHO, F. T; WHITELOW, J. H., 1990, "Flow of non-newtonian fluids in a pipe", *Journal of Non-newtonian Fluid Mechanics*, v. 34, pp. 129–144.
- RAFFEL, M; WILLERT, C. W. S. K. J., 2007, *Particle Image Velocimetry - A Practical Guide 2 ed.* Springer, New York.
- ROSEHART, R.G; RHODES, E. S. D., 1975, "Studies of gas-liquid (non-newtonian) slug flow: void fraction meter, void fraction and slug characteristics", *The Chemical Eng. Journal*, v. 10, pp. 57–64.
- SCHULKES, A., 2011, "Slug Frequencies Revised", *15th International Conference on Multiphase Production Technology*, v. 50, pp. 311–325.
- SOLEIMANI, A; AL SARKHI, A. H. T. J., 2002, "Effect of drag-reducing polymers on pseudo-slugs: interfacial drag and transition to slug flow", *Int. J. Multiphase Flow*, v. 23, pp. 700–709.
- SUAREZ, A.; LOUREIRO, J. S. F. A., 2016, "Turbulence and Bubble Break up in Slug Flow with Wall Injection", *Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, v. 16, pp. 1993.
- TAITEL, Y; DUCKER, A., 1976, "A model for prediction flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow", *AIChE Journal*, v. 22, pp. 47–55.
- TAITEL, Y; DUCKER, A., 1977, "A model for slug frequency during gas-liquid flow in horizontal and near horizontal pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, v. 3, pp. 585–596.
- THOMAS, J., 2004, *Fundamentos de engenharia de petroleo.* Interciencia.
- WEISMAN, J; DUNCAN, D. G. J. C. T., 1979, "Effects of fluid properties and pipe diameter on two phase flow patterns in horizontal lines", *Int. J. Multiphase Flow*, v. 5, pp. 437–462.
- WEISMAN, J., 1983, *Handbook of fluids in motion.* Ann arbor Science Publ.
- XU, J; WU, Y. L. H. G. J. C. Y., 2009, "Study of drag reduction by gas injection for power-law fluid flow in horizontal stratified and slug flow regimes", *Chemical Engineering Journal*, v. 147, pp. 235–244.
- XU, J; WU, Y. S. Z. L. L. D., 2007, "Studies on two-phase co-current air/non-Newtonian shear-thinning fluid flows in inclined smooth pipes", *Int. J. Multiphase Flow*, v. 33, pp. 948–969.

# Apêndice A

## Parâmetros de ajuste do PIV

### A.1 *Software* Dynamic Studios 2015a

-full name: Quantel Big Sky Laser  
use both cavities in single frame mode: enable  
max trigger frequency: 15Hz

#### ● **Pulse Receiver 1**

activation time:  $-200 \mu s$   
activation time relation:  
rst light pulse  
activation pulse train: 2,9;  $0 \mu s$   
activation signal polarity: positive  
sync with TBP: yes  
start at every n'th signal: 1  
start sync at n'th signal: 1

#### ● **Pulse Receiver 2**

activation time:  $-100 \mu s$   
activation time relation: second light pulse  
activation pulse train: 2,7;  $0 \mu s$   
activation signal polarity: positive  
sync with TBP: yes  
start at every n signal: 1  
start sync at n signal: 1

#### ● **Speed Sense M310**

perform in camera calibration: calibration is old

perform black reference calibration:  
perform flat field correction: calibration is old  
flat field correction: disable  
hot pixel correction: disable  
black reference offset value: 10  
exposure time frame 1: 500.000  $\mu s$   
frame mode: use default from system control  
mirroring or rotate: rotate 180 deg  
pixel depth: 12  
image area (ROI): 0; 200; 1280; 400 pixels  
image buffer: internal image buffer  
image shift: 0 image shift  
image count: 5000 images

- time between pulses: 800  $\mu s$
- trigger rate: 15Hz
- number of images: 5000
- double frame mode
- abertura da câmara: f/4

#### • Quantel Big Sky Laser

repetition rate laser 1: ext trig  
repetition rate laser 2: D/A  
q-switch laser 1: ext trig  
q-switch laser 2: D/A  
laser intensity L1: 5  
laser intensity L2: 3