



Leonardo Soares Fernandes

**Medição do Campo de Velocidade do Líquido no escoamento
Bifásico, Intermitente, em Duto Horizontal, Utilizando
Velocimetria Estereoscópica.**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuir Azevedo
Coorientador: Dr. Fábio Jessen Werneck de Almeida Martins

Rio de Janeiro
Março de 2017



Leonardo Soares Fernandes

**Medição do Campo de Velocidade do Líquido no Escoamento
Bifásico, Intermitente, em Duto Horizontal, Utilizando
Velocimetria Estereoscópica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luiz Fernando Alzuguir Azevedo

Orientador
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Fábio Jessen Werneck de Almeida Martins

Coorientador
Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Marcelo Andreotti

GE Global Research

Dr. João Neuenschwander Escosteguy Carneiro

Sintef do Brasil

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de Março de 2017

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

Leonardo Soares Fernandes

Graduou-se em Engenharia Química pela Universidade Federal Fluminense, em dezembro de 2014. Concluiu pós-graduação em Engenharia de Sistemas Offshore, pela COPPE/UFRJ, em dezembro de 2015 e estagiou na empresa BG Brasil. Atualmente participa de projetos de pesquisa no Laboratório de Engenharia de Fluidos, na PUC-Rio, na área de escoamento multifásico.

Ficha Catalográfica

Fernandes, Leonardo Soares

Medição do campo de velocidade do líquido no escoamento bifásico, intermitente, em duto horizontal, utilizando velocimetria estereoscópica / Leonardo Soares Fernandes; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo ; co-orientador: Fábio Jessen Werneck de Almeida Martins. – 2017.

196 f.; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Escoamento bifásico intermitente. 3. Campo de velocidade. 4. PIV estereoscópico. I. Azevedo, Luis Fernando Alzuguir. II. Martins, Fábio Jessen Werneck de Almeida. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, Luiz Roberto Fernandes e Marisa Fernandes e à
minha noiva, Mariana Amaral, pelo apoio ao longo deste
trabalho.

Agradecimentos

Talvez o tópico de agradecimento seja o mais difícil de escrever em toda a dissertação. É um tanto quanto desafiador olhar para os últimos dois anos e tentar expressar tudo o que se passou, e o que diversas pessoas significaram, em algumas palavras. Entrei no mestrado solteiro, saí noivo. Entrei ingênuo e saí mais maduro. Aprendi muito. Espero não esquecer de nenhum desses momentos.

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Marisa Soares Fernandes e Luiz Roberto Monteiro Fernandes, que insistiram para que eu permanecesse no mestrado, mesmo antes de eu encontrar meu lugar na PUC, e mesmo que aquela não fosse, no momento, a minha vontade. No final das contas, vocês estavam certos. Se eu cheguei até aqui, devo muito a vocês.

Agradeço à minha noiva, Mariana Amaral, futura Mariana Fernandes. De alguma maneira, você sempre conseguiu tornar o caminho mais fácil, e, mesmo nos momentos de grande estresse e desespero, me motivou a ser um engenheiro melhor. As noites viradas no laboratório foram tiradas de letra, e os dias me esperando, no frio do laboratório, viraram desenhos no Paint. Obrigado.

Agradeço a minha avó, irmã, primos, tios, e amigos. Pessoas que presenciaram, mesmo que indiretamente, o que esse mestrado significou para mim.

Agradeço ao meu amigo e ex-colega de trabalho, Marcelo Mendes, por ter me sugerido de fazer o mestrado na PUC-Rio.

Agradeço aos amigos que fiz durante as matérias do mestrado, em especial Martha, Gabriel e Cris. Pessoas que fizeram meu primeiro ano aqui mais fácil e divertido.

Agradeço ao meu orientador, Luiz Fernando Azevedo, carinhosamente chamado de Lu, que além de ser um engenheiro brilhante, é uma pessoa excepcional. Não poderia ter escolhido melhor.

Agradeço ao meu coorientador, Fábio Martins, vulgo Fabão, por toda a ajuda ao longo deste trabalho. Mais que coorientador, virou meu amigo.

Não poderia faltar também um agradecimento a todas as pessoas do Laboratório de Engenharia de Fluidos. Mudanças na vida sempre são um desafio, e assim foi meu começo na PUC. Acostumado à rotina Centro-Niterói-Urca, encontrei na Gávea pessoas que se tornariam uma nova família. Além das pessoas já citadas, preciso agradecer ao Igor, guru de toda a eletrônica utilizada; Rodrigo, seu pupilo; Jubs, entusiasta das técnicas óticas; e todos os membros do laboratório, como Paula, Helena, Luciana, Guilherme, Márcio, Leozinho, etc. O bom relacionamento e a amizade com vocês foi fundamental.

Agradeço, também, à FAPERJ, à CAPES e à Petrobras, pelo auxílio financeiro recebido, sem o qual, este trabalho seria inviável.

Agradeço aos membros da banca examinadora, por dedicar parte do seu tempo para ler e assistir à apresentação do meu trabalho.

Por fim, agradeço a você, que está usando parte do seu tempo para ler este trabalho. Espero que a leitura seja boa, e que possa, de alguma maneira, agregar aos seus conhecimentos.

Resumo

Fernandes, Leonardo Soares; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir (orientador); Martins, Fabio Jessen Werneck de Almeida (coorientador). **Medição do campo de velocidade do líquido no escoamento bifásico, intermitente, em duto horizontal, utilizando velocimetria estereoscópica.** Rio de Janeiro, 2017. 196p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Escoamentos intermitentes gás-líquido são encontrados em diversas aplicações de engenharia, como em linhas de produção de petróleo e em sistemas de refrigeração de reatores nucleares. O conhecimento detalhado deste padrão de escoamento é indispensável para a construção de modelos matemáticos representativos deste fenômeno físico complexo. No presente trabalho, foi desenvolvido um estudo experimental com o objetivo de fornecer informações que possibilitem a melhoria dos modelos existentes para o escoamento bifásico intermitente em duto horizontal. A técnica de velocimetria por imagem de partículas estereoscópica (SPIV) de alta frequência foi empregada, em conjunto com a técnica de fluorescência induzida por laser (LIF), permitindo a obtenção de campos de velocidade na região do pistão de líquido, a jusante da bolha alongada, e na região do filme líquido, a montante da bolha. O arranjo experimental possibilitou a medição das três componentes do vetor velocidade do escoamento bifásico água-glicerina e ar na seção transversal de uma tubulação horizontal de 40mm de diâmetro interno. Os resultados obtidos, originais na literatura, mostraram a evolução detalhada das três componentes dos campos médios do vetor velocidade ao longo da passagem da bolha alongada durante o escoamento intermitente.

Palavras-chave

Escoamento bifásico intermitente; Campo de velocidade; PIV estereoscópico

Abstract

Fernandes, Leonardo Soares; Azevedo, Luis Fernando Alzuguir (advisor); Martins, Fabio Jessen Werneck de Almeida (coadvisor). **Stereo-PIV liquid velocity measurements in two-phase, intermitent flow in a horizontal pipe.** Rio de Janeiro, 2017. 196p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Gas-liquid intermittent flows can be found in many engineering applications, such as oil production lines and nuclear reactors cooling systems. The detailed knowledge of this flow pattern is necessary for the development of accurate mathematical models of this complex phenomenon. In this work, an experimental study was developed with the goal to provide data that could be used to improve the existing models for two-phase intermittent flow in horizontal pipes. The high-frequency stereoscopic particle image velocimetry (SPIV) technique was employed along with the laser induced fluorescence (LIF) technique, allowing the measurement of velocity fields in the liquid slug, downstream of the elongated bubble, and in the liquid film, upstream of the elongated bubble. The experimental arrangement allowed the measurement of the three components of the velocity vector in an intermittent two-phase water-glycerine and air flow, in a transversal sections of a 40mm internal diameter horizontal pipe. The results obtained revealed original detailed information on the evolution of the three components of the averaged velocity field associated with the passage of the elongated bubble characteristic of the intermittent flow.

Keywords

Two-phase Intermittent flow; Velocity field; Stereo-PIV

Sumário

1	Introdução	27
1.1.	Padrões de escoamento	28
1.2.	Mapas das configurações do escoamento	32
1.3.	Motivação e objetivo	35
1.4.	Organização do trabalho	36
2	Escoamento intermitente	37
2.1.	Relevância do estudo do escoamento intermitente	37
2.2.	Conceitos básicos	38
2.2.1.	Terminologias no escoamento multifásico	38
2.2.2.	Grandezas no escoamento em golfada	40
2.3.	Formação do escoamento intermitente	42
2.3.1.	Golfada severa	42
2.3.2.	Golfada hidrodinâmica	44
2.4.	Características do escoamento intermitente	46
2.4.1.	Comprimento do pistão de líquido	47
2.4.2.	Frequência no escoamento intermitente	50
2.4.3.	Queda de pressão	53
2.4.4.	Hold-up na região do pistão líquido	58
2.4.5.	Velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido	58
2.4.6.	Comprimento da bolha alongada	59
2.4.7.	Velocidade de translação da bolha alongada	60
2.5.	Modelagem do escoamento em golfada	63
2.5.1.	Modelos estacionários	63
2.5.2.	Modelos transientes	64
3	Técnicas experimentais	68
3.1.	Introdução às técnicas experimentais	68
3.2.	Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)	70
3.2.1.	Pré-processamento	72
3.2.2.	Processamento das imagens	73
3.2.3.	Pós-processamento	75

3.3. PIV Estereoscópico	76
3.3.1. Vantagens em relação a técnica longitudinal	77
3.3.2. Configurações do SPIV	78
3.3.3. Calibração e geração do vetor tridimensional	81
3.4. Outras técnicas de PIV	84
3.5. Fluorescência induzida por laser	85
3.6. Sistema de interruptores de feixe	87
4 Revisão bibliográfica	89
4.1. Local studies in horizontal gas-liquid slug flow (Sharma et al., 1998)	89
4.2. Slug velocity profiles in horizontal gas-liquid flow (Bertola, 2002)	90
4.3. Simultaneous HS-PIV and shadowgraph measurements of gas-liquid flows in a horizontal pipe (Carpintero-Rogero et al., 2006)	91
4.4. Medição do campo instantâneo de velocidade do líquido no escoamento bifásico intermitente em tubos horizontais e inclinados (Fonseca Junior, 2010)	92
4.5. Three-dimensional unit slug in a horizontal pipe (Febres, et al., 2010)	93
4.6. High-speed stereo and 2D PIV measurements of two-phase slug flow in a horizontal pipe (Czapp, et al., 2012)	94
4.7. Investigations on slug flow in a horizontal pipe using stereoscopic particle image velocimetry and CFD simulation with volume of fluid method (Czapp, et al., 2012)	96
4.8. Simultaneous velocity measurement and the coupling effect of the liquid and gas phases in slug flow using PIV-LIF technique (Siddiqui, et al., 2016)	97
4.9. Avaliação do estado da arte	99
5 Seção de testes	100
5.1. Descrição geral da seção de testes	100
5.2. Sistema de escoamento de líquido	103
5.2.1. Bomba de cavidades progressivas e inversor de frequência	103
5.2.2. Tanque de líquido	104

5.3. Sistema de escoamento de ar	105
5.4. Estação de medição	105
5.4.1. Sistema de aquisição de imagens	105
5.4.2. Caixa de visualização	107
5.5. Sistema de PIV estereoscópico	108
5.5.1. Câmeras	109
5.5.2. Sistema de iluminação	109
5.5.3. Sincronizador	110
5.5.4. Partículas	110
5.5.5. Filtro ótico	111
5.5.6. Alvo de calibração	111
5.6. Sistema de interruptores de feixe	113
6 Procedimento experimental	114
6.1. Determinação dos parâmetros experimentais	114
6.1.1. Abertura da lente da câmera	114
6.1.2. Cálculo da massa de partículas	117
6.1.3. Ponto de operação	119
6.2. Procedimento de calibração	120
6.3. Validação com escoamento monofásico	125
6.4. Escoamento intermitente	127
6.4.1. Dados estatísticos	127
6.4.2. Aquisição das imagens	128
6.4.3. Processamento das imagens	129
6.4.4. Máscara das imagens na região do filme líquido	131
7 Resultados	135
7.1. Escoamento de validação monofásico	135
7.2. Estatísticas do escoamento intermitente	138
7.2.1. Comprimento do pistão de líquido	138
7.2.2. Velocidade de translação do nariz da bolha alongada	141
7.3. Campos vetoriais do escoamento intermitente	143
7.3.1. Região do pistão de líquido	143
7.3.2. Região do filme líquido	162

8 Conclusão	185
9 Referências bibliográficas	188

Lista de figuras

Figura 1-1 – Configurações mais comuns para o escoamento horizontal gás-líquido. Adaptado de Fonseca Junior (2010).	30
Figura 1-2 – Padrões de escoamento vertical mais comuns. Adaptado de Fonseca Junior (2010).	31
Figura 1-3 – Mapa proposto por Baker (1953) para escoamento bifásico horizontal.	33
Figura 1-4 – Mapa ilustrando a região de transição entre as configurações para diferentes diâmetros: linha pontilhada (12,5mm), linha sólida (25mm), linha pontilhada e tracejada (50mm) e linha tracejada (300 mm). Disponível em Brennen (2005).	34
Figura 2-1 - Célula unitária de golfada. Adaptado de Carpintero-Rogero (2008)	40
Figura 2-2 – Formação da golfada severa durante a produção de petróleo (Taitel, 1986).	43
Figura 2-3 – Perfil de velocidade na seção longitudinal do pistão líquido em um escoamento intermitente. Adaptado de Taitel et al. (1990).	47
Figura 2-4 – Relação entre a velocidade da cauda e do nariz de bolhas de gás subsequentes. (Cook et al. 2000)	48
Figura 2-5 – Frequência de golfada para diferentes velocidades superficiais (Woods et al. 2006).	51

Figura 2-6 – Frequência na forma adimensional para diferentes diâmetros da tubulação (Woods et al. 2006).	52
Figura 2-7 – Coeficientes para a correlação da perda de carga pelo modelo de Lockhart-Martinelli. Adaptado de Lockhart et al. (1949).	55
Figura 2-8 - Queda de pressão em uma célula unitária de golfada para o modelo de Dukler et al. (1975). Adaptado de Carpintero-Rogero (2008)	57
Figura 2-9 – Comprimento médio da bolha alongada em função da velocidade superficial de gás Wang et al. (2007).	60
Figura 3-1 – Princípio de funcionamento da técnica de PIV (fonte: http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv)	71
Figura 3-2 – Típico resultado de correlação cruzada. Fonte: Almeida (1997).	74
Figura 3-3 – Comportamento na região próxima ao pico de correlação para diferentes deslocamentos. Fonte: Abrantes et al. (2012).	74
Figura 3-4 - Medida com PIV estereoscópico do campo de velocidades em um jato espiralado (Abrantes et al., 2012).	76
Figura 3-5 - Erro ocasionado pelo deslocamento da partícula na direção do terceiro componente na técnica de PIV longitudinal (Prasad, 2000).	77
Figura 3-6 - Disposição das câmeras na configuração de translação (Prasad, 2000)	79
Figura 3-7 – Disposição das câmeras na configuração de rotação. (Prasad, 2000).	79

Figura 3-8 – Variação da magnificação ao longo do plano do objeto para o critério de Scheimpflug (Prasad, 2000).	80
Figura 3-9 - Alvo antes e após a distorção da imagem por uma função de mapeamento (Van Doorne et al., 2007).	82
Figura 3-10 – Fluxograma do processo de SPIV seguindo a recomendação de (Soloff et al., 1997).	84
Figura 3-11 - Espectro de absorção e emissão para uma substância fluorescente. Fonte: Thermo Scientific.	86
Figura 3-12 - Princípio de funcionamento da técnica de Fluorescência induzida por laser para aplicação em PIV.	87
Figura 3-13 – Funcionamento do sistema de interruptores de feixe (Fonseca Junior, 2010).	88
Figura 4-1 – Velocidade média ao longo do escoamento em golfada (Carpintero-Rogero et al., 2006)	92
Figura 4-2 – Velocidade na direção axial (w). Iso-superfícies representam a velocidade na direção vertical (v) (Czapp et al., 2012).	95
Figura 4-3 – Comparação da simulação numérica e dados experimentais da fração de vazios e velocidade na direção axial em diversos pontos de uma célula unitária de golfada (Czapp et al., 2012).	97
Figura 4-4 – Perfil de velocidade médio, na direção axial, na região de filme líquido em ambas as fases do escoamento em golfada.	98
Figura 5-1 – Desenho tridimensional da seção de testes.	101

Figura 5-2 – Desenho esquemático da seção de testes.	102
Figura 5-3 - Curva de operação da bomba de cavidades progressivas utilizada.	103
Figura 5-4 – Detalhe do tanque de separação com suas principais medidas.	104
Figura 5-5 – Vistas (a) lateral e (b) superior da estação de medição.	106
Figura 5-6 – Suporte utilizado para controlar o posicionamento das câmeras.	106
Figura 5-7 – Desenho da caixa de visualização de acrílico.	107
Figura 5-8 – Foto da caixa montada na seção, com o alvo de calibração em seu interior.	108
Figura 5-9 – Sistema de iluminação da técnica de SPIV em funcionamento.	110
Figura 5-10 – Aparato desenvolvido para a calibração.	112
Figura 5-11 – Vista do alvo de calibração.	112
Figura 5-12 – Sistema de interruptores de feixe.	113
Figura 6-1 – Localização do caso estudado no mapa de configurações de escoamentos bifásicos.	120
Figura 6-2 – Iluminação frontal ao alvo para o procedimento de calibração.	121

Figura 6-3 – Vista das câmeras e do alvo de calibração inserido dentro do tubo.	122
Figura 6-4 - Imagens do alvo de calibração na posição +0,5mm, adquiridas pelas câmeras da esquerda e da direita.	123
Figura 6-5 – Par de imagens binarizadas do alvo na posição +0,5mm.	123
Figura 6-6 – Par de imagens distorcidas do alvo de calibração na posição +0,5mm, obtidas pelas câmeras da esquerda e da direita	124
Figura 6-7 – Superposição do par de imagem do alvo de calibração na posição +0,5mm.	125
Figura 6-8 – Correção da malha a partir do perfil da componente axial da velocidade, em um escoamento laminar.	126
Figura 6-9 – Ruídos no sinal lógico devido a presença de bolhas dispersas no pistão de líquido. Adaptado de Laurindo (2012).	128
Figura 6-10 – Exemplo de gráfico utilizado para avaliar se não houve problema de sincronização entre as imagens. LA, LB, RA e RB indicam os quadros A e B das câmeras da esquerda e da direita, respectivamente.	131
Figura 6-11 – Imagem do máximo de intensidade em cada pixel, para a região 10ms a montante da bolha, para as câmeras da esquerda e da direita, respectivamente. É possível observar a obstrução causada pela bolha alongada.	132
Figura 6-12 – Imagem obtida a partir da intensidade máxima em cada pixel, das imagens obtidas a partir do máximo de intensidade, para o ponto 10ms a montante da bolha.	133

Figura 6-13 – Imagem obtida a partir da intensidade mínima, em cada pixel, das imagens obtidas a partir do máximo de intensidade, para o ponto 10ms a montante da bolha.	133
Figura 6-14 – Delimitação automática da região de bolha alongada (contorno vermelho) e de obstrução (contorno verde), para o caso - 10ms.	134
Figura 7-1 - Comparação do perfil de velocidades medido, ao longo da direção X e Y, com o perfil teórico.	136
Figura 7-2 – Campo médio da componente de velocidade na direção principal do escoamento na seção transversal da tubulação. A simetria observada é um indício da correta aplicação da técnica.	137
Figura 7-3 - Histograma do comprimento do pistão de líquido para o escoamento intermitente estudado.	139
Figura 7-4 - Papel de probabilidade do logaritmo do comprimento do pistão de líquido para pistões maiores que 16D	140
Figura 7-5 - Histograma do comprimento do pistão de líquido para pistões maiores que 16D.	140
Figura 7-6 - Histograma da velocidade de translação do nariz da bolha alongada para as duas regiões de comprimento do pistão de líquido.	141
Figura 7-7 - Histograma da média das 1000 reamostragens da velocidade de translação do nariz da bolha alongada.	142
Figura 7-8 – Esquema dos pontos de aquisição, ao longo da passagem de uma célula unitária.	143

- Figura 7-9 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos +2ms e +14ms a jusante da bolha alongada. A posição na bolha alongada das figuras está fora de escala. 144
- Figura 7-10 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos +2ms e +4ms a jusante da bolha alongada. 145
- Figura 7-11 - Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada. 146
- Figura 7-12 - Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada. 147
- Figura 7-13 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos +2ms e +4ms a jusante da bolha alongada. 149
- Figura 7-14 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada. 150
- Figura 7-15 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos +10ms e +12ms a jusante da bolha alongada. 151
- Figura 7-16 – Campos de velocidade mostrando a componente u em cores para os pontos +2ms e +4ms a jusante da bolha alongada. 152
- Figura 7-17 – Campos de velocidade mostrando a componente u em cores para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada. 153

Figura 7-18 – Campos de velocidade mostrando a componente u em cores para os pontos +10ms e +12ms a jusante da bolha alongada.	154
Figura 7-19 – Campos de velocidade mostrando a componente v em cores para os pontos +2ms e +4ms a jusante da bolha alongada.	155
Figura 7-20 – Campos de velocidade mostrando a componente v em cores para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada.	156
Figura 7-21 – Campos de velocidade mostrando a componente v em cores para os pontos +10ms e +12ms a jusante da bolha alongada.	157
Figura 7-22 – Magnitude da vorticidade, na direção axial, para o ponto 8ms a jusante da bolha alongada.	159
Figura 7-24 – Magnitude da vorticidade, na direção axial, para o ponto 12ms a jusante da bolha alongada.	160
Figura 7-23 – Magnitude da vorticidade, na direção axial, para o ponto 10ms a jusante da bolha alongada.	160
Figura 7-25 – Componente w do vetor velocidade para diferentes pontos a jusante da bolha alongada.	161
Figura 7-26 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos 0ms e -2ms a montante da bolha alongada.	163
Figura 7-27 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos -4ms e -6ms a montante da bolha alongada.	164
Figura 7-28 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos -8ms e -10ms a montante da bolha alongada.	165

- Figura 7-29 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos -12ms e -14ms a montante da bolha alongada. 166
- Figura 7-30 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos 0ms e -2ms , a montante da bolha alongada. 169
- Figura 7-31 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos -4ms e -6ms , a montante da bolha alongada. 170
- Figura 7-32 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos -8ms e -10ms , a montante da bolha alongada. 171
- Figura 7-33 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos -12ms e -14ms , a montante da bolha alongada. 172
- Figura 7-34 – Campos de velocidade, mostrando a componente u em cores para os pontos 0ms e -2ms , a montante da bolha alongada. 174
- Figura 7-35 – Campos de velocidade, mostrando a componente u em cores para os pontos -4ms e -6ms , a montante da bolha alongada. 175
- Figura 7-36 – Campos de velocidade, mostrando a componente u em cores para os pontos -8ms e -10ms , a montante da bolha alongada. 176
- Figura 7-37 – Campos de velocidade, mostrando a componente u em cores para os pontos -12ms e -14ms , a montante da bolha alongada. 177

Figura 7-38 – Campos de velocidade, mostrando a componente v em cores para os pontos 0ms e -2ms, a montante da bolha alongada.	178
Figura 7-39 – Campos de velocidade, mostrando a componente v em cores para os pontos -4ms e -6ms, a montante da bolha alongada.	179
Figura 7-40 – Campos de velocidade, mostrando a componente v em cores para os pontos -8ms e -10ms, a montante da bolha alongada.	180
Figura 7-41 – Campos de velocidade, mostrando a componente v em cores para os pontos -12ms e -14ms, a montante da bolha alongada.	181
Figura 7-42 – Perfil da componente w do vetor velocidade para diferentes pontos na região de filme líquido.	183
Figura 7-43 - Perfil da componente w do vetor velocidade para pontos mais afastados do nariz da bolha, na região de filme líquido.	184

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Comprimento mínimo do pistão líquido	49
Tabela 2.2 - Comprimento médio do pistão de líquido	49
Tabela 2.3 – Coeficientes de Chisholm.	56
Tabela 2.4 – Correlações para o fator de atrito, conforme sugerido por Issa et al. (2003)	66
Tabela 6.1 – diâmetro das partículas na imagem para diferentes aberturas da câmera	116

Lista de variáveis

Letras latinas

- A – Área da seção transversal (m^2)
A_p – Área de uma partícula, em pixels, na imagem ($pixel^2$)
A_{L1} – Área transversal do filme de líquido na região logo em frente ao pistão (m^2)
c – Velocidade da luz no vácuo (m/s)
C – Concentração das partículas (partícula/ m^3)
Cd – Coeficiente de arraste (adimensional)
Co – Constante (adimensional)
D – Diâmetro da tubulação (m)
d_{diff} – Contribuição da difração na abertura da lente para o tamanho das partículas (m)
d_i – Distância da imagem a lente (m)
d_o – Distância do objeto a lente (m)
d_p – Diâmetro das partículas (m)
d_{im}^{*} – Diâmetro da partícula na imagem (pixel)
D_B – Diâmetro da bolha dispersa no pistão de líquido (m)
E – Energia do fóton (J)
E_o – Número de Eötvös (adimensional)
f – Fator de atrito de Darcy (adimensional)
f# - Abertura focal das lentes, *f-number* (adimensional)
Fr – Número de Froude (adimensional)
g – Aceleração da gravidade (m/s^2)
G – Fluxo de massa da fase gás (kg/s)
h – Constante de Planck (J.s)
h_f – Altura do filme líquido (m)
l_m – Comprimento da região de aceleração do filme líquido (m)
j – Velocidade superficial (m/s)
L – Fluxo de massa da fase líquido (kg/s)
LA – Imagem do quadro A da câmera da esquerda (adimensional)
LB – Imagem do quadro B da câmera da esquerda (adimensional)
RA – Imagem do quadro A da câmera da direita (adimensional)
RB – Imagem do quadro B da câmera da direita (adimensional)
L_f – Comprimento da região de filme líquido (m)
L_s – Comprimento da região do pistão líquido (m)
L_U – Comprimento da célula unitária (m)
M – Magnificação (adimensional)
M_n – Magnificação normal (adimensional)
M_{par} – Massa total de partículas (kg)
m_{par} – Massa de uma partícula (kg)
n_{ar} – índice de refração do ar (adimensional)
n_{acril} – índice de refração do acrílico (adimensional)
n_{água} – índice de refração da água (adimensional)
n_p – Número de partículas (partícula)

N – Número de termos (adimensional)
 N_f – Número de viscosidade inverso (adimensional)
 N_s – Densidade da imagem, *source density* (partícula.pixel²)
 p – Pressão (Pa)
 ppp – Particles per pixel (partícula)
 Q – Vazão volumétrica (m³/s)
 Re – Número de Reynolds (adimensional)
 Re_B – Número de Reynolds de uma bolha dispersa (adimensional)
 s – Razão de escorregamento (*slip ratio*) entre a velocidade de gás e de líquido no pistão líquido (adimensional)
 S – Perímetro (m)
 u – Velocidade média da fase (m/s)
 u – Velocidade do fluido na direção perpendicular à força gravitacional e ao escoamento (m/s)
 v – Velocidade do fluido na direção paralela à força gravitacional (m/s)
 w – Velocidade do fluido na direção do escoamento (m)
 u_b – Velocidade da frente da bolha (nariz da bolha) (m/s)
 u_B – Velocidade média das bolhas dispersas no pistão líquido (m/s)
 u_d – Velocidade de deslizamento (m/s)
 u_{Gf} – Velocidade média da fase gás na região do filme líquido (m/s)
 u_{Lf} – Velocidade média da fase líquido na região do filme líquido (m/s)
 u_{LS} – Velocidade média da fase líquida na região do pistão líquido (m/s)
 u_T – Velocidade da traseira da bolha (ou frente do pistão de líquido) (m/s)
 V_{part} – Volume de uma partícula (m³)
 V_{sol} – Volume da solução (m/s)
 x,y,z – Coordenadas no espaço (m)
 X,Y – Coordenadas na imagem (pixel)

Letras gregas

α – Ângulo entre o plano da lente e o plano da imagem (radiano)
 α_G – Fração de vazio (*Void Fraction*) (adimensional)
 α_L – Fração de líquido (*Hold-up*) (adimensional)
 $\delta_{padr\tilde{a}o}$ – Incerteza padrão das medições (m/s)
 δ_z – Profundidade de campo (m)
 $\Delta_{x,y,z}$ – Deslocamento da partícula nas direções x, y ou z (m)
 Δp_m – Perda de carga na região de aceleração do filme líquido (Pa/m)
 Δp_p – Perda de carga na região do pistão de líquido sem aceleração (Pa/m)
 Δp_s – Perda de carga na região do pistão de líquido (Pa/m)
 Δ_{pixel} – Tamanho de um pixel (m)
 Δ_z – Espessura do plano de laser (m)
 θ – Inclinação da tubulação (radiano)
 θ – Ângulo entre o plano do objeto e o plano da lente (radiano)
 λ – Fator de correção para o mapa de Baker (1953) (adimensional)
 λ – Comprimento de onda (m)
 μ – Viscosidade dinâmica (Pa.s)
 ρ – Densidade (kg/m³)
 ρ_{part} – Densidade de uma partícula (kg/m³)
 σ – Tensão superficial (N/m)
 ν_s – Frequência do escoamento intermitente (Hz)

ψ – Fator de correção para o mapa de Baker (1953) (adimensional)
 Ω – Hold-up na condição de não-deslizamento (adimensional)

Subscritos

B – Bolha dispersa
f – região de filme líquido
G – Fase gás
i – Interface
L – Fase líquido
m – Mistura
p - Partícula
s – Região do pistão de líquido
w – Parede (*wall*)

Siglas

BCP – Bomba de cavidades progressivas
CCD – Charge-Coupled Device
CMOS – Complementary metal-oxide semiconductor
FFT – Fast Fourier Transform
LED – Light Emitting Diode
LIF – Laser Induced Fluorescence
LSV – Laser Speckle Velocimetry
PIV – Particle Image Velocimetry
PTV – Particle Tracking Velocimetry
RMS – *Root mean square*
SPIV – Stereoscopic Particle Image Velocimetry
URANS (Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes)
VOF – Volume of fluid

1 Introdução

Escoamento multifásico é o escoamento no qual há mais de uma fase presente, podendo ser líquida, sólida ou gasosa e com um nível de separação superior ao nível molecular. Escoamentos multifásicos podem ocorrer na natureza, como em ciclones, chuvas e poluição de rios e mares e em processos industriais, como plantas de geração de energia nuclear, condensadores, torres de destilação, transporte de petróleo bruto, dentre outros. O escoamento multifásico é encontrado, inclusive, em sistemas biológicos, pois fluidos corporais, como o sangue, geralmente contém células ou partículas em suspensão, caracterizando, assim, mais de uma fase.

No contexto de escoamento multifásico, estão incluídos os escoamentos bifásicos, sendo o gás-líquido o mais comum e, ao mesmo tempo, um dos mais complexos, pois possui uma interface deformável e uma fase compressível (Hetsroni, 1982). Ocorre com frequência na produção de petróleo, na coluna de produção dos poços ou nas linhas que ligam a árvore de natal à plataforma. Durante a produção, o fluido presente no reservatório sofre despressurização, o que muitas vezes é suficiente para levar à formação de gás, caracterizando, assim, escoamento bifásico. Com a exploração e a produção de petróleo em regiões cada vez mais profundas, as distâncias dos poços para as plataformas vêm aumentando, tornando, de acordo com Hua et al. (2011) a utilização de poços satélites a única solução viável economicamente. Neste caso, os poços são conectados diretamente à unidade central, com linhas de grandes comprimentos, fator este que potencializa a ocorrência de escoamento bifásico.

Gás e líquido escoam em tubulações em diversos padrões, como bolhas dispersas, golfada, dentre outros. Existem mapas que procuram

relacionar propriedades dos fluidos, características do escoamento (como velocidade de cada fase) e aspectos geométricos da tubulação (como diâmetro interno e inclinação) com os padrões existentes. Tais mapas são extremamente importantes no projeto de tubulações e estudo de escoamento gás-líquido, pois os diferentes regimes apresentam diferentes modelos para troca de calor, perda de carga, etc.

O conhecimento detalhado de cada padrão de escoamento deve levar a modelos mais representativos matematicamente do fenômeno físico. O presente trabalho busca fornecer dados experimentais que possibilitem a melhoria dos modelos existentes para o escoamento horizontal intermitente. Como será explicado adiante, não há um consenso na literatura sobre quais regimes são considerados golfada ou bolha alongada (alguns autores ainda consideram outros regimes intermitentes além dos citados). Apesar da tentativa de alguns autores como Carpintero-Rogero et al. (2006) de colocar tal dependência baseada em adimensionais, como o número de Froude, diversos autores classificam tais padrões apenas como intermitente. Neste trabalho, não haverá, portanto, uma preocupação em definir qual o regime específico do escoamento em estudo, sendo este considerado intermitente. A revisão bibliográfica e tudo que será citado adiante levará em consideração, portanto, ambos os casos.

1.1. Padrões de escoamento

Uma das principais dificuldades encontradas no estudo de escoamento bifásico gás-líquido, é que as taxas de transferência de *momentum*, massa e calor entre as fases dependem diretamente da área de interface entre as mesmas, e tal área varia significativamente para os diversos padrões de escoamento existentes. Há uma dependência bidirecional entre o tipo de escoamento ocorrendo e a geometria das fases. Ainda existe muito a ser desenvolvido antes de alcançarmos um bom entendimento de como tais relações se desenvolvem (Brennen, 2005).

A classificação das diferentes configurações geométricas das fases gás e líquido em padrões de escoamento surge como uma ferramenta para

facilitar o estudo de escoamentos multifásicos. Não existe, porém, um consenso entre os autores sobre quantos arranjos existem e quais os limites entre eles. Enquanto alguns buscam um maior nível de detalhe, outros tentam ser mais práticos e minimizar o número de classificações. Wallis (1969), por exemplo, utiliza definições baseadas na forma do escoamento e subdivisões para classificar as regiões de transição entre diferentes padrões (como região golfada-anular).

A não uniformização descrita acima tende a dificultar a comparação de dados de diferentes laboratórios. Neste texto, será feita uma breve descrição dos principais padrões de escoamento encontrados na literatura, informações mais detalhadas podem ser encontradas em livros como os de Wallis (1969) e Hetsroni (1982) ou, mais recentemente, Brennen (2005) e Kolev (2007). A Figura 1-1 ilustra os principais padrões no escoamento horizontal, quando a gravidade age perpendicularmente ao fluxo, o que gera uma assimetria no escoamento. Tais padrões são:

- Escoamento Estratificado (*Stratified Flow*)

No escoamento estratificado há separação gravitacional entre as fases, com a fase líquida, mais densa, escoando abaixo da fase gasosa. Ocorre para vazões (ou velocidades superficiais) das fases relativamente baixas, em comparação aos outros padrões de escoamento.

- Escoamento Ondulado (*Wavy Flow*)

Quando a vazão de gás aumenta, no escoamento estratificado, aumenta também a taxa de cisalhamento na interface gás-líquido. Surgem assim, ondulações que caracterizam o escoamento ondulado.

- Escoamento em Golfada (*Slug Flow*)

Com o aumento da vazão de líquido no escoamento ondulado, as ondas podem alcançar a parte superior da tubulação, formando regiões líquidas que ocupam toda a tubulação e gerando um regime intermitente, no qual os fluxos de gás e líquido são alternados. O escoamento em golfada se caracteriza pela alternância entre um escoamento semelhante ao estratificado (com gás escoando a velocidades maiores que a velocidade

média da mistura, sobre um filme líquido) e o escoamento de um pistão líquido, altamente aerado em algumas regiões.

- Escoamento Pistonado (*Plug Flow*)

Também chamado de bolha alongada (*elongated bubble*), ocorre para vazões de gás mais baixas que no escoamento em golfada. Também é um escoamento intermitente, porém, nesse caso, o pistão líquido não é aerado, encontrando-se praticamente livre de gás.

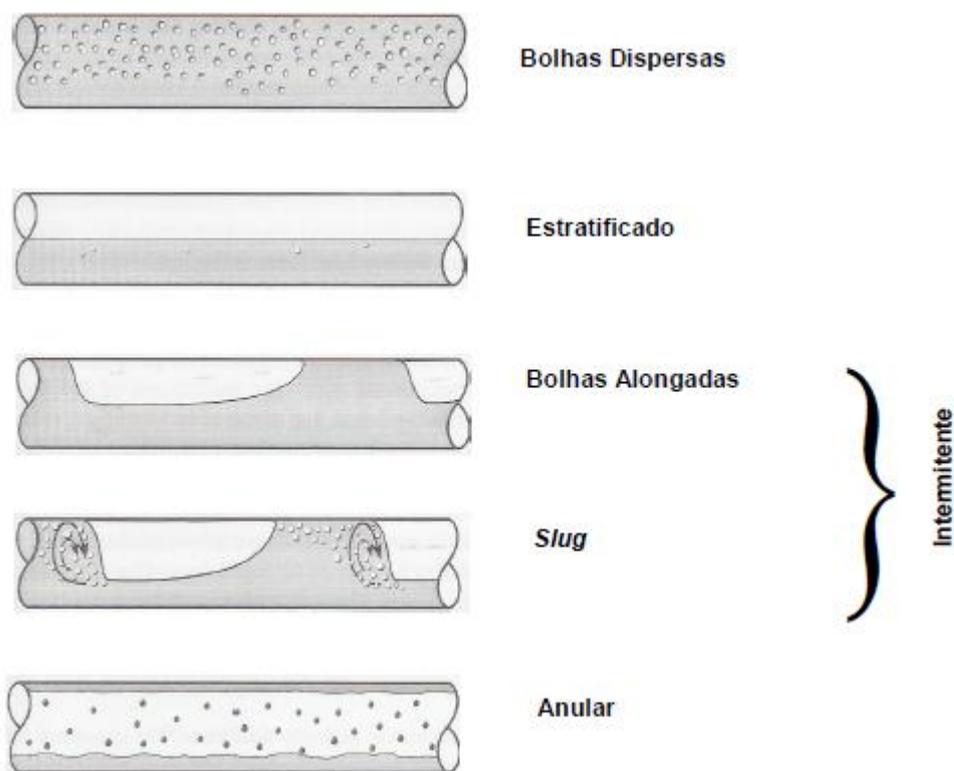


Figura 1-1 – Configurações mais comuns para o escoamento horizontal gás-líquido. Adaptado de Fonseca Junior (2010).

- Escoamento em Bolhas Dispersas (*Disperse Flow*)

É a configuração na qual a fase gasosa está dispersa no formato de bolhas, que tendem a se concentrar na parte de cima da tubulação, devido ao empuxo da fase líquida (esta, considerada contínua). Ocorre para vazões elevadas da fase líquida e quanto maior esta, mais homogênea é a

distribuição axial das bolhas. Geralmente é considerado que ambas as fases escoam na mesma velocidade.

- Escoamento Anular (*Annular Flow*)

Configuração na qual a fase líquida se encontra na região próxima à parede da tubulação, em formato de anel. Devido à ação da gravidade, a espessura do filme na região inferior tende a ser maior que na região superior. O escoamento anular ocorre para altas vazões de gás e é comum existirem gotículas de líquido dispersas na fase gasosa.

No escoamento vertical, a distribuição tende a ser simétrica, o que pode mudar a configuração das fases no regime em golfada, pistonado, anular e bolhas dispersas. Como a gravidade age na mesma direção do escoamento, não há separação por diferença de densidade ou empuxo. Algumas das principais configurações estão ilustradas na Figura 1-2. É comum também, a definição dos seguintes regimes, além daqueles encontrados no escoamento horizontal:

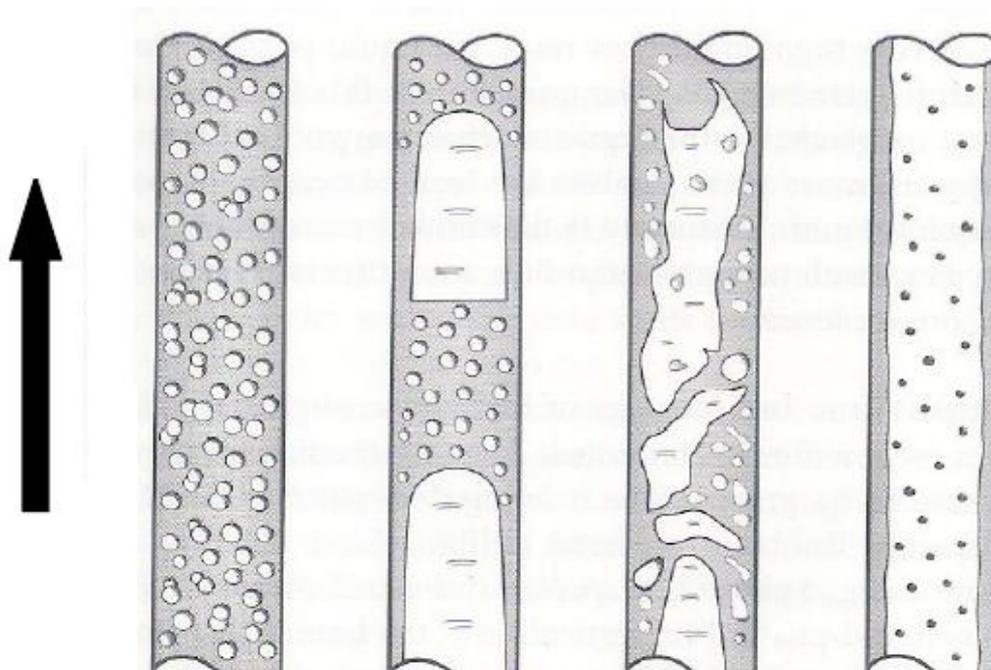


Figura 1-2 – Padrões de escoamento vertical mais comuns. Adaptado de Fonseca Junior (2010).

- Escoamento Caótico (*Churn Flow*)

Ocorre quando a vazão de gás do escoamento intermitente fica muito elevada, não sendo possível manter as bolhas na forma características de tais regimes e extinguindo a clara interface existente entre as fases. A quebra do padrão do escoamento de gás pode fazer com que o líquido descenda, gerando um movimento oscilatório que faz com que o mesmo, ora suba, ora desça.

- Escoamento em Bolhas (*Bubbly Flow*)

É semelhante ao escoamento em bolhas dispersas, porém, ocorre para vazões de líquido menores, o que permite a formação de bolhas maiores. De acordo com Brennen (2005), aqui a diferença de velocidade entre as fases pode ser considerável (há deslizamento entre as fases).

1.2. Mapas das configurações do escoamento

Existem na literatura diversos mapas que buscam dividir os diversos padrões descritos anteriormente em regiões, de modo que, conhecidos determinados parâmetros do escoamento, se torne possível determinar a configuração na qual o escoamento se encontra.

É provável que o primeiro mapa tenha sido proposto por Baker (1953) que, estudando experimentalmente a perda de pressão em escoamentos bifásicos, percebeu que a configuração do escoamento deve ser levada em consideração no desenvolvimento de modelos para o gradiente de pressão. O mapa proposto encontra-se na Figura 1-3. Os termos ψ e λ são fatores de correção utilizados para a utilização do mesmo mapa para diferentes fluidos (o experimento foi executado com ar e água) e os termos G e L são os fluxos de massa da fase gás e líquido, respectivamente.

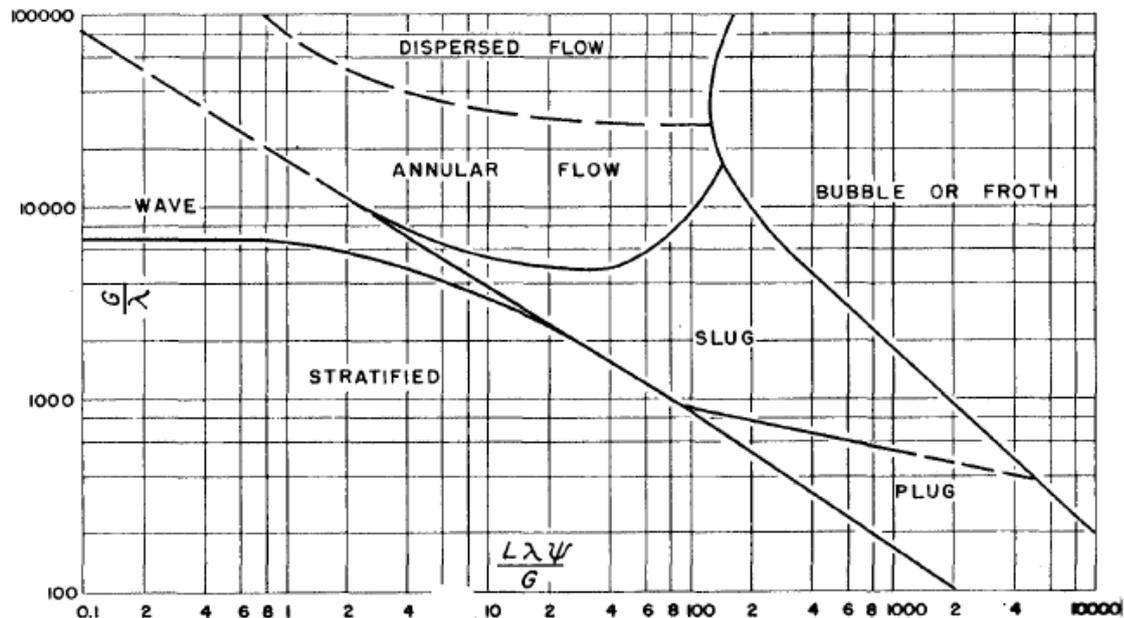


Figura 1-3 – Mapa proposto por Baker (1953) para escoamento bifásico horizontal.

Ao longo dos anos, diversos mapas foram propostos, para configurações horizontais, verticais e inclinadas. Alguns mapas são puramente baseados em dados experimentais, como o proposto por Mandhane et al. (1974) e outros são baseados em modelos matemáticos, como o proposto por Taitel et al. (1976).

Os diversos mapas existentes podem utilizar variáveis dimensionais, adimensionais ou ambas, para definir os valores nos eixos. Apesar de muitos dependerem apenas de parâmetros adimensionais (geralmente número de Reynolds, número de Froude e relações entre vazões), não existem mapas universais que possam ser aplicados para qualquer situação. A igualdade dos parâmetros, mesmo adimensionais, não garante que determinados mapas possam ser utilizados. Mesmo para geometrias simples, cuidados devem ser tomados na utilização de mapas para diâmetros de tubulação diferentes daquelas utilizadas no experimento e diferentes pares de fluidos, por exemplo, pois configurações diferentes da esperada podem ocorrer (Brennen, 2005). A Figura 1-4 mostra como

diferentes diâmetros da tubulação podem levar a diferentes regiões de transição. Neste mapa, as coordenadas são expressas pela velocidade superficial de cada fase (ver seção 2.2.1)

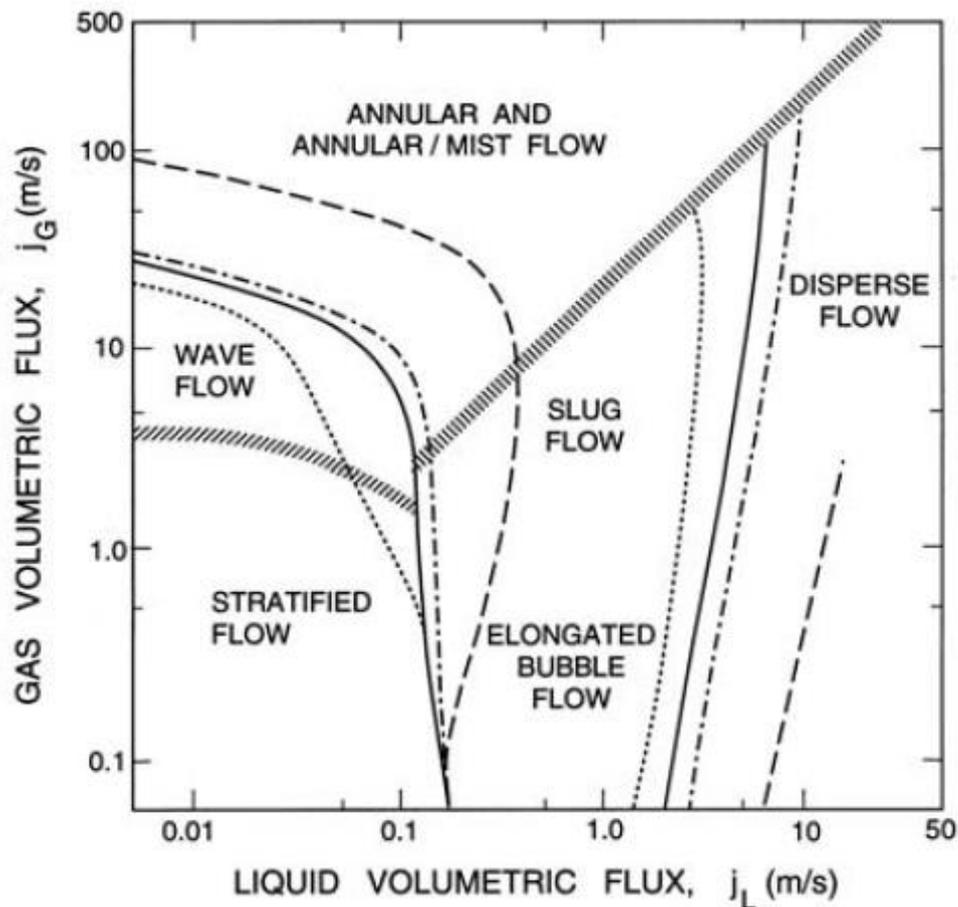


Figura 1-4 – Mapa ilustrando a região de transição entre as configurações para diferentes diâmetros: linha pontilhada (12,5mm), linha sólida (25mm), linha pontilhada e tracejada (50mm) e linha tracejada (300 mm). Disponível em Brennen (2005).

Os mapas propostos, em geral, dividem as regiões por linhas, porém, é um consenso que pontos perto de tais linhas devem ser considerados como uma região mal caracterizada, de transição entre os diferentes tipos de escoamento. É comum que a classificação nessas regiões varie com a opinião pessoal de cada pesquisador.

Apesar de todas as restrições descritas anteriormente, os mapas de padrões de escoamento possuem vasta aplicação, sendo amplamente utilizados na indústria e em pesquisas em laboratórios.

1.3. Motivação e objetivo

O escoamento intermitente está presente em diferentes ramos da engenharia, desde sistemas de refrigeração de usinas nucleares até linhas de produção de petróleo. Como será exposto na seção 2.1, a alternância entre gás e líquido característica do escoamento intermitente pode gerar sérios problemas, seja para a estrutura dentro da qual o fluxo ocorre ou para equipamentos a jusante do mesmo. O conhecimento detalhado da física que governa este fenômeno é uma informação crucial na obtenção de modelos matemáticos que representem o mesmo de maneira satisfatória.

O presente trabalho é um estudo fundamental do campo de velocidades em um escoamento intermitente. Como será descrito no capítulo 4, não existem, até o presente momento, trabalhos que tenham medido as 3 componentes do vetor velocidade, em seções transversais da tubulação, de maneira satisfatória. Este trabalho busca fornecer essas informações a partir da técnica de velocimetria por imagem de partícula estereoscópica (SPIV), que, conforme descrito no capítulo 3, julga-se ser a mais indicada. É esperado que os dados aqui obtidos possam melhorar o entendimento do fenômeno em estudo, além de serem utilizados como base de comparação para validação de modelos numéricos.

Este trabalho é uma continuação da linha de pesquisa inaugurada no Laboratório de Engenharia de Fluidos, da PUC-Rio, por Roberto Fonseca Junior, com o estudo do escoamento intermitente a partir da técnica de PIV longitudinal. Os trabalhos vêm sendo desenvolvido sempre em parceria com a Petrobras.

1.4. Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado em 8 capítulos.

O presente capítulo 1 introduz a dissertação, mostrando a motivação e o objetivo do trabalho desenvolvido.

No capítulo 2, é feita uma descrição do escoamento intermitente, incluindo seus principais parâmetros de interesse, sua formação e métodos computacionais utilizados para descrevê-lo. Ao leitor já familiarizado com este regime de escoamento, em particular, é aconselhável pular esse capítulo.

No capítulo 3, são descritas as técnicas experimentais utilizadas neste trabalho, focando principalmente na técnica de velocimetria por imagem de partícula estereoscópica e fluorescência induzida por partículas. O leitor já familiarizado com tais técnicas é encorajado a pular esse capítulo.

No capítulo 4 é realizada uma revisão bibliográfica de diversos trabalhos na literatura que buscaram obter medidas do perfil de velocidade na fase líquida de um escoamento intermitente. São apresentados trabalhos com diversas técnicas experimentais, além da avaliação do estado da arte deste tema.

No capítulo 5 é descrita a seção de testes utilizada no experimento, bem como os principais equipamentos necessários para utilizar a técnica de SPIV

No capítulo 6 é descrito todo o procedimento experimental adotado, como cálculo da concentração de partículas, calibração, validação com o caso monofásico e metodologia de detecção da interface.

No capítulo 7 os resultados são expostos e discutidos. São apresentadas as três componentes do vetor velocidade, ao longo da seção transversal, para a região de pistão de líquido e de filme líquido.

No capítulo 8, são apresentadas as conclusões do trabalho e propostas para estudos futuros.

Por fim, o capítulo 9 contém as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

2 Escoamento intermitente

Neste capítulo será feita uma revisão do escoamento intermitente. Será exposta a relevância do estudo de tal regime, seguido das principais variáveis utilizadas no seu estudo e de como ocorre a formação da golfada. Por fim, serão mostradas as principais características deste padrão de escoamento, além dos modelos matemáticos que vêm sendo utilizados para descrevê-lo. O leitor já familiarizado com trabalhos sobre escoamento intermitente é encorajado a pular este capítulo e seguir para o capítulo 3.

2.1. Relevância do estudo do escoamento intermitente

Como descrito anteriormente, no escoamento intermitente há alternância entre fluxo de líquido (podendo existir pequenas bolhas dispersas) e fluxo de gás, acima de um filme líquido.

O escoamento intermitente ocorre com muita frequência no escoamento de petróleo bruto, seja por vazões de líquido e gás que levam naturalmente a essa configuração ou por transientes inerentes à produção de petróleo. Alguns dos motivos que justificam a importância do estudo de tal padrão de escoamento, de acordo com Carpintero-Rogero (2008) e Carbone (2015), são:

- Grande variação no fluxo de gás e líquido, que podem levar a grandes variações na densidade média do fluido, acarretando em variações abruptas no torque do eixo de bombas, podendo causar danos no sistema de bombeamento.
- Elevada perda de pressão, com elevados gradientes de pressão, se compararmos a um fluido de mesma densidade média.

- Problemas estruturais devido à interação fluido-estrutura, como forças de reação maiores que as projetadas (a velocidade da bolha é maior que a velocidade média do escoamento) ou ressonância da estrutura, caso a frequência de intermitência se aproxime da frequência natural do sistema.

Ainda de acordo com Kvernfold et al. (1984), a grande variação na tensão de cisalhamento na parede durante o escoamento em golfada pode remover a proteção de corrosão ali presente, diminuindo a vida útil da tubulação e aumentando a possibilidade de acidentes.

2.2. Conceitos básicos

Como no estudo de qualquer fenômeno físico, no escoamento multifásico, existem grandezas de interesse, que são utilizadas para modelar ou definir o regime. Aqui serão expostas as terminologias utilizadas no escoamento multifásico e as principais grandezas de interesse do escoamento em golfada.

2.2.1. Terminologias no escoamento multifásico

No escoamento bifásico gás-líquido, é comum a utilização do subscrito G para se referir à fase gás e L para a fase líquida. O conceito mais simples é o de velocidade média de cada fase, u , definida nas equações (2.1) e (2.2),

$$u_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (2.1)$$

$$u_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (2.2)$$

onde Q é a vazão volumétrica e A é a área da seção transversal ocupada pelo líquido ou pelo gás.

Obviamente, a determinação da área ocupada por cada fase não é uma tarefa trivial. A relação entre o volume ocupado pela fase gás (volume de vazio) e o volume total é denominado de fração de vazio (*void fraction*) e o símbolo utilizado é α_G . Quando o volume referido é o da fase líquida, é comum a utilização do termo *hold-up* e do símbolo α_L . Para volumes de controle pequenos, pode ser feita a aproximação que a relação entre os volumes é a relação entre as áreas. Assim, a fração de vazio e o *hold-up* de líquido podem ser definidos conforme as equações (2.3) e (2.4).

$$\alpha_G = \frac{A_G}{A} \quad (2.3)$$

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A} \quad (2.4)$$

Obviamente, vale também a seguinte relação:

$$\alpha_G + \alpha_L = 1 \quad (2.5)$$

Outra definição muito utilizada, principalmente nos mapas de configurações do escoamento como o de Mandhane et al. (1974), é a de velocidade superficial (ou fluxo volumétrico), j , que é a velocidade de cada fase escoasse sozinha na tubulação. Assim:

$$j_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.6)$$

$$j_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.7)$$

Conseqüentemente, a velocidade da mistura, j_m , pode ser definida por:

$$j_m = \frac{Q}{A} = \frac{Q_L + Q_G}{A} = j_G + j_L \quad (2.8)$$

2.2.2. Grandezas no escoamento em golfada

De acordo com Wallis (1969), um importante conceito no estudo do escoamento intermitente é a definição de célula unitária, uma região que contém uma bolha alongada e um pistão de líquido, conforme ilustrado para o escoamento em golfada na Figura 2-1.

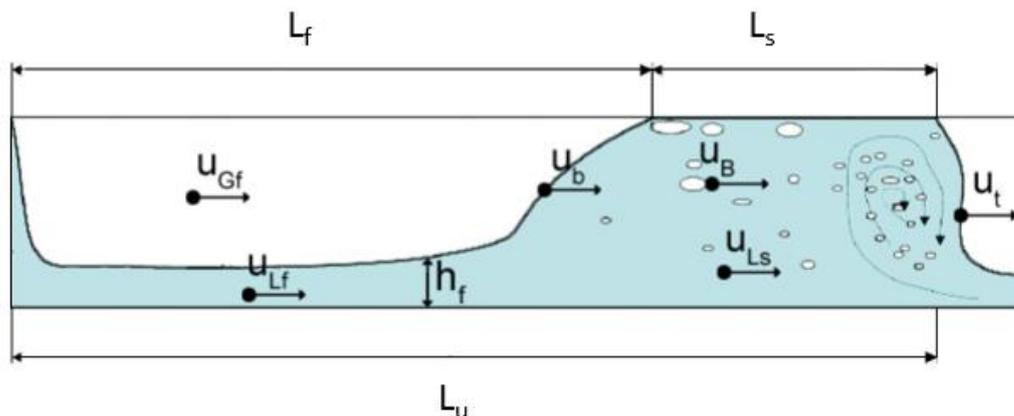


Figura 2-1 - Célula unitária de golfada. Adaptado de Carpintero-Rogero (2008)

Algumas grandezas de interesse no estudo do escoamento intermitente estão ilustradas na célula unitária, são elas:

L_f – Comprimento da região de filme líquido, ou comprimento da bolha.

L_s – Comprimento da região do pistão líquido.

L_u – Comprimento da célula unitária, igual a soma de L_f e L_s .

u_{Gf} – Velocidade média da fase gás na região do filme líquido.

u_{Lf} – Velocidade média da fase líquida na região do filme líquido.

h_f – Altura do filme líquido.

u_b – Velocidade da frente da bolha (nariz da bolha).

u_B – Velocidade média das bolhas dispersas no pistão líquido.

u_{LS} – Velocidade média da fase líquida na região do pistão líquido.

U_T – Velocidade da traseira da bolha (ou frente do pistão de líquido).

Para regime permanente, e assumindo que ambas as fases são incompressíveis na célula unitária, a continuidade rege que a vazão volumétrica total é constante em qualquer parte da célula unitária (Woods et al., 1996). Assim:

$$Q = Q_L + Q_G = \text{Constante} \quad (2.9)$$

Dividindo a equação (2.9) pela área da seção transversal, que também é constante, e usando as equações (2.6) e (2.7), temos que:

$$j_L + j_G = j_m = \text{Constante} \quad (2.10)$$

As equações (2.9) e (2.10) são verdadeiras para a região de pistão líquido e para a região da bolha de gás. Assim, substituindo as equações já expostas na seção 2.2.1, e após uma matemática simples, chegamos a seguinte relação:

$$j_m = u_{Lf}\alpha_{Lf} + u_{Gf}\alpha_{Gf} = u_{Gf}\alpha_{Gf} + (1 - \alpha_{Gf})u_{Lf} \quad (2.11)$$

$$j_m = u_{LS}\alpha_{LS} + u_{GS}\alpha_{GS} = u_{GS}\alpha_{GS} + (1 - \alpha_{GS})u_{LS} \quad (2.12)$$

O subscrito f denomina a região do filme líquido e o subscrito s denomina a região do pistão de líquido. A velocidade da fase gás na região do pistão é igual a das bolhas dispersas ($u_{GS} = u_B$).

É definido, então, de acordo com Woods et al. (1996), um escorregamento (slip ratio) entre a velocidade de gás e de líquido no pistão líquido:

$$s = \frac{u_{GS}}{u_{LS}} \quad (2.13)$$

Combinando a equação (2.13) com a equação (2.12), chegamos na seguinte relação para a velocidade média na região do pistão líquido:

$$u_{LS} = \frac{j_m}{1 + (s - 1)\alpha_{GS}} \quad (2.14)$$

A partir da equação (2.14), podemos observar que para o caso do pistão não ser aerado ($\alpha_{GS} = 0$) ou para o caso de não haver deslizamento entre as bolhas de gás e o líquido presentes no pistão ($s = 1$), a velocidade média do líquido pistão é igual a velocidade média da mistura. Além disso, para o caso das bolhas se movendo mais devagar que o líquido ($s < 1$), a velocidade do pistão será maior que a velocidade média da mistura.

2.3. Formação do escoamento intermitente

O escoamento intermitente pode ser classificado, de acordo com sua formação, em dois grupos: golfadas hidrodinâmicas ou golfadas severas. Enquanto a golfada severa ocorre devido ao acúmulo de líquido em uma região da tubulação, a golfada hidrodinâmica (chamada por vezes, puramente de golfada) ocorre por ser o arranjo natural do escoamento para determinadas condições (Ujang et al. 2006). Uma descrição mais detalhada dos mecanismos que levam a formação da golfada para ambos os casos será discutida adiante.

2.3.1. Golfada severa

Golfada severa é o nome dado quando características do arranjo da tubulação levam ao escoamento em golfada. Ocorre quando uma região da tubulação está em um nível mais baixo, seguido de um nível mais elevado, permitindo que ocorra acúmulo de líquido nesta região. Tal fenômeno é

observado em linhas submarinas, na região anterior ao *riser*, ou em tubulações em terrenos ondulados.

De acordo com Taitel (1986), o processo de formação da golfada severa durante a produção de petróleo ocorre de maneira similar ao desenho esquemático da Figura 2-2. Inicialmente, deve existir escoamento estratificado de gás e líquido, permitindo o acúmulo de líquido na região mais baixa do arranjo, bloqueando a passagem de gás. A pressão na região anterior ao bloqueio aumenta, causando a compressão do gás. Quando a pressão na região a montante do bloqueio for maior que a pressão a jusante somada à pressão hidrostática da coluna de líquido, o balanço de forças faz com que o pistão líquido se mova. Se, no momento que a região de líquido atinge o topo do *riser*, a região de gás ainda não tiver chegado ao fundo do mesmo, uma situação instável é atingida e uma pequena perturbação faz com que a região de líquido se mova a altas velocidades, enquanto o gás pressurizado se expande. É o chamado *blowout*, que caracteriza a golfada severa.

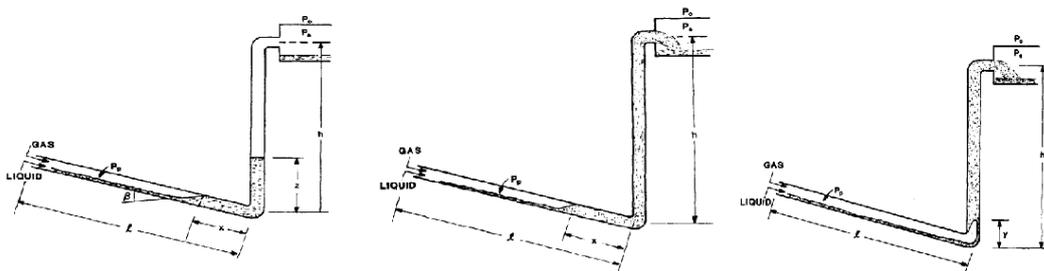


Figura 2-2 – Formação da golfada severa durante a produção de petróleo (Taitel, 1986).

No caso de golfadas severas, a região de líquido deve chegar no topo do *riser* antes da região de gás atingir o fundo do mesmo. Logo, o aumento do *riser*, assim como o encurtamento da linha antes da região mais baixa do arranjo são fatores que tornam o sistema mais estável, dificultando a ocorrência de golfada severa. Apesar disso, muitas vezes, tais mudanças são impossíveis no projeto, sendo necessárias outras soluções. Um estudo executado por Schmidt et al. (1980) mostrou que uma

solução mais prática para eliminar golfadas severas é aumentando a pressão no topo do *riser*, o que pode ser conseguido aumentando a pressão no separador ou usando uma válvula *choke* antes deste.

2.3.2.

Golfada hidrodinâmica

Golfadas hidrodinâmicas são aquelas descritas nos mapas de regime de escoamento, como o de Mandhane et al. (1974). No presente trabalho, a intermitência se origina a partir de processos hidrodinâmicos, originados a partir do escoamento estratificado na entrada da seção. De acordo com Hurlburt et al. (2002), três principais teorias são comumente utilizadas para explicar a formação e desenvolvimento da golfada hidrodinâmica a partir do escoamento estratificado. Essas teorias são: a clássica instabilidade invíscida de *Kelvin-Helmholtz*, a teoria de instabilidade de uma onda longa e viscosa e, finalmente, a teoria de estabilidade da golfada. É interessante notar que, apesar da literatura normalmente utilizar o termo golfada hidrodinâmica, as teorias descritas adiante buscam explicar a intermitência, podendo ser aplicadas para o regime de bolhas alongadas ou golfada

2.3.2.1.

Teoria invíscida de *Kelvin-Helmholtz*

A teoria invíscida de *Kelvin-Helmholtz* explica a transição do escoamento estratificado para o escoamento intermitente a partir de ondulações na interface gás-líquido. A teoria assume que ambos os fluidos têm viscosidade desprezíveis (são invíscidos), são incompressíveis, e que alguma perturbação leve à elevação da interface gás-líquido, fazendo com que a velocidade da fase gás aumente, diminuindo, conseqüentemente, a pressão neste ponto (efeito Bernoulli). A instabilidade ocorre quando a diminuição da pressão faz com que a interface tenda a se elevar ainda mais, tendência que se opõe à gravidade e à tensão superficial (em menor escala). Nesta situação, a sucção é um efeito desestabilizador e a gravidade um efeito estabilizador, que pode ser utilizado para prever

quando o escoamento estratificado irá se tornar um escoamento intermitente (Ujang et al. 2006).

Uma melhoria no modelo foi executada por Taitel et al. (1976), que percebendo que a instabilidade ocorria para velocidades menores que o previsto. Eles desenvolveram um modelo baseado na instabilidade de *Kelvin-Helmholtz*, que melhora a previsão para escoamento de ar e água.

2.3.2.2.

Teoria de instabilidade de uma onda longa e viscosa

A aplicação da teoria invíscida de *Kelvin-Helmholtz* despreza a viscosidade do líquido como um efeito que contribui para a instabilidade, o que só é verdade para líquidos muito viscosos. Tal problema foi contornado por Lin et al. (1986) que, com a teoria de instabilidade linear, incluíram os efeitos de viscosidade. Eles observaram que para líquidos com viscosidade entre 1 e 500 cp, a teoria viscosa prevê condições críticas de instabilidade mais moderadas. Para fluidos muito viscosos, ambas as teorias preveem os mesmos critérios de instabilidade. O modelo desenvolvido por Lin et al. (1986) funciona bem para velocidades superficiais de gás menores que 3,3 m/s.

2.3.2.3.

Teoria da estabilidade da golfada

Diferentemente das duas teorias apresentadas anteriormente, esta não foca nas condições de instabilidade que levam o escoamento estratificado a se tornar intermitente, mas sim nas condições que levam a golfada a ser estável. De acordo com Hurlburt et al. (2002), a formação da golfada não é condição suficiente para que tal regime se desenvolva, a estabilidade da mesma também é condição necessária e pode, inclusive, determinar a transição para este escoamento.

Esta teoria é baseada na quantidade de líquido que entra e sai do pistão de líquido, visto que o mesmo possui uma velocidade média superior ao filme líquido na região de bolha. Assim, o pistão admite líquido da região de líquido a sua frente e perde líquido para a região de líquido na sua

traseira. Quando a taxa de líquido que entra é igual à que sai, o pistão não cresce ou decresce, mas permanece com o mesmo comprimento. É de se esperar, portanto, que nesta condição exista uma altura mínima do filme líquido, que possa suprir a vazão volumétrica necessária para a estabilidade do escoamento. De acordo com Woods et al. (1996), esta relação é dada pela área transversal do filme líquido na região logo em frente ao pistão, como mostra a equação (2.15):

$$\left(\frac{A_{L1}}{A}\right)_{crit} = \frac{(u_B - u_{Ls})(1 - \alpha_G)}{(u_B - u_{Lf})} \quad (2.15)$$

Na equação acima, A_{L1} é a área transversal do filme de líquido na região logo em frente ao pistão. As demais grandezas são as mesmas já apresentadas.

As três teorias aqui discutidas foram combinadas por Hurlburt et al. (2002) em uma única metodologia para prever a ocorrência de escoamento intermitente.

2.4. Características do escoamento intermitente

Nesta seção, serão expostas as principais características do escoamento intermitente, como: comprimento do pistão, perfil de velocidade, perda de carga, fração de vazio, etc. De acordo com Carpintero-Rogero (2008), poucos modelos teóricos estão disponíveis na literatura para tratar de tal assunto, sendo um campo explorado principalmente a partir de modelos empíricos, baseados em testes com geometrias e pares de fluidos específicos. A maior parte das correlações são desenvolvidas para água e ar, o que faz com que muitas não representem corretamente o fenômeno quando são utilizados líquidos, por exemplo, mais viscosos (Farsetti et al. 2014). O pleno conhecimento das propriedades do escoamento em golfada ainda está longe de ser alcançado.

2.4.1. Comprimento do pistão de líquido

De acordo com Cook et al. (2000), o conhecimento do comprimento do pistão de líquido no escoamento intermitente é importante por dois principais motivos: primeiro, por que é um dos dados que devem ser fornecidos como “chute inicial” para calcular a perda de pressão ou a fração de vazios a partir de modelos estacionários, como o proposto por Dukler, et al. (1975) ou por Taitel et al. (1990). Além disso, é uma informação importante para o projeto de equipamentos que farão parte do processo, como vasos de separação, trocadores de calor, etc.

É consenso na literatura, que o escoamento em golfada é um fenômeno estocástico e que o comprimento dos pistões de líquido (L_s) variam no escoamento, em torno de um valor médio. Para entender esta afirmação, é necessária a compreensão de como o escoamento em golfada se desenvolve. De acordo com Taitel et al. (1990), a velocidade na qual a bolha de gás se move é relacionada com a velocidade máxima do líquido logo à sua frente. Como ilustrado na Figura 2-3, para pistões de líquido pequenos, como o pistão 1, o perfil de velocidade ainda não é plenamente desenvolvido e a bolha anterior a este se move a uma velocidade maior que a bolha anterior ao pistão 2, quando este já é grande o suficiente para que o perfil de velocidade se encontre plenamente desenvolvido. Devido a esta diferença de velocidade, as bolhas eventualmente coalescem, e o líquido é absorvido pelo pistão anterior, que aumenta em tamanho.

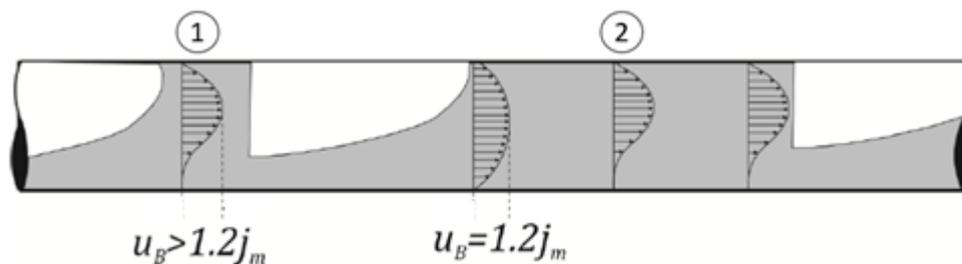


Figura 2-3 – Perfil de velocidade na seção longitudinal do pistão líquido em um escoamento intermitente. Adaptado de Taitel et al. (1990).

Inicialmente, os pistões líquidos são pequenos em tamanho. O processo descrito acima faz com que os pistões cresçam em tamanho até adquirirem um comprimento mínimo, a partir do qual as bolhas de gás não colapsam mais.

Uma relação entre a velocidade do nariz da bolha de gás (U_b) e a velocidade da traseira da bolha logo à sua frente (U_T) em função do comprimento do pistão (L_S) foi proposta por Cook et al. (2000):

$$\frac{U_B}{U_T} = 1,0 + 0,56 \exp\left(-0,46 \frac{L_S}{D}\right) \quad (2.16)$$

A equação (2.16) é a curva que melhor ajusta os dados experimentais obtidos, conforme ilustrado na Figura 2-4.

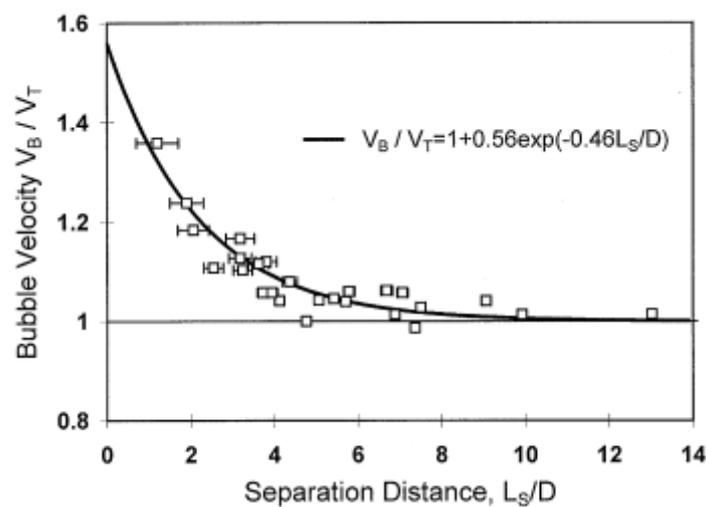


Figura 2-4 – Relação entre a velocidade da cauda e do nariz de bolhas de gás subsequentes. (Cook et al. 2000)

Baseado em tais dados, eles propuseram que, para valores de L_S/D menores que 10, os pistões são instáveis, e continuam crescendo. Este seria, portanto, o menor comprimento possível do pistão. Diversos outros autores também estudaram o comprimento mínimo do pistão líquido, com diversos diâmetros de tubulação, e obtiveram diferentes resultados. A Tabela 2.1 mostra um resumo de alguns desses trabalhos. Não foram

observados estudos sobre o efeito do diâmetro na relação L_s/D , mostrando que tal fenômeno ainda precisa de estudos mais aprofundados.

Tabela 2.1 - Comprimento mínimo do pistão líquido

Referência	Fluidos	Inclinação	Diâmetro	$\left(\frac{L_s}{D}\right)_{Min}$
Nydal et al. (1992)	Água e ar	0°	53,0mm	8
Fagundes Netto (2001)	Água e ar	0°	53,0mm	6,3
Cook et al. (2000)	Água e ar	+5°	50,0mm	10
Woods et al. (2006)	Água e ar	0°	76,3mm	5

O comprimento mínimo de pistão líquido é o menor valor para o qual as bolhas de gás não colapsam, o que não significa que o pistão não possa continuar crescendo. De acordo com Fagundes Netto (2001), quando o pistão de líquido a montante é menor que o pistão de líquido a jusante (condição inversa à Figura 2-3), este cresce em comprimento. Nydal et al. (1992) reportaram que o comprimento médio do pistão de líquido na tubulação não varia muito para diferentes vazões de gás e líquido. A Tabela 2.2 ilustra os trabalhos de diversos autores na determinação da relação L_s/D . É possível observar uma diferença nos valores para diferentes diâmetros e pares de fluidos.

Tabela 2.2 - Comprimento médio do pistão de líquido

Referência	Fluidos	Diâmetro	$\left(\frac{L_s}{D}\right)_{Médio}$
Dukler et al. (1975)	Água e ar	38,1mm	12-30
Nicholson et al. (1978)	Óleo leve e ar	25,8mm e 51,2mm	≈ 30
Nydal et al. (1992)	Água e ar	53mm	15-20
Nydal et al. (1992)	Água e ar	90mm	12-16
Carneiro et al. (2011)	Água e ar	24mm	15,7-19,4

2.4.2. Frequência no escoamento intermitente

A importância do conhecimento e estudo da frequência no escoamento intermitente é semelhante à do comprimento do pistão de líquido. Tal informação é necessária para o dimensionamento de equipamentos que serão conectados no processo e serve de equação de fechamento para modelos estacionários, como o proposto por Dukler, et al. (1975). A frequência (v_s) é definida como o inverso do período, ou o inverso do tempo que uma célula unitária demora para se mover entre dois pontos.

Na região próxima à entrada da tubulação, onde o escoamento não é desenvolvido e os pistões de líquido são pequenos, a frequência é elevada, estabilizando conforme os pistões vão se sobrepondo e aumentando de tamanho. A grande maioria dos trabalhos que buscam equações empíricas para a frequência de golfada focam na região desenvolvida. A seguir, serão discutidas algumas dessas equações.

Utilizando gás carbônico e água em uma tubulação de 19,1mm de diâmetro interno, Gregory et al. (1969) propuseram a seguinte relação empírica:

$$v_s = 0,0226 \left[\frac{j_L}{gD} \left(\frac{19,75}{j_m} + j_m \right) \right]^{1,2} \quad (2.17)$$

Rearranjando os termos da equação (2.17), Greskovich et al. (1972) chegaram na seguinte relação:

$$v_s = 0,0226 \left[\Omega \left(\frac{2,02}{D} + Fr^2 \right) \right]^{1,2} \quad (2.18)$$

Onde Ω e Fr_M são o *hold-up* de líquido na condição de não-deslizamento e o número de Froude da mistura, respectivamente, e estão definidos nas equações (2.19) e (2.20).

$$\lambda = \frac{j_L}{j_m} \quad (2.19)$$

$$Fr_M = \frac{j_m}{\sqrt{gD}} \quad (2.20)$$

Mais recentemente, Woods et al. (2006) observaram, em uma tubulação de 95mm de diâmetro interno, que para velocidades superficiais de líquido fixas, a frequência diminui com o aumento da velocidade superficial de gás até $j_G = 4\text{ m/s}$, onde ocorre a inflexão e a frequência passa a aumentar com a velocidade superficial de gás. Este ponto é onde ocorre, portanto, a frequência mínima para tais condições. Para velocidades superficiais de gás fixas, a frequência aumenta para qualquer aumento da velocidade superficial de líquido. Tais tendências estão ilustradas na Figura 2-5.

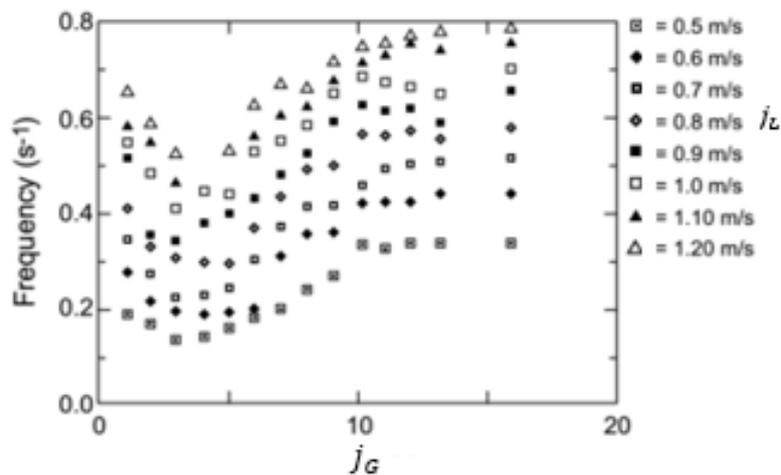


Figura 2-5 – Frequência de golfada para diferentes velocidades superficiais (Woods et al. 2006).

Ainda de acordo com Woods et al. (2006), o uso de adimensionais adequados pode, de maneira grosseira, levar a equação (2.21), conforme ilustrado na Figura 2-6.

$$\frac{v_s D}{j_L} = 0,05 \quad (2.21)$$

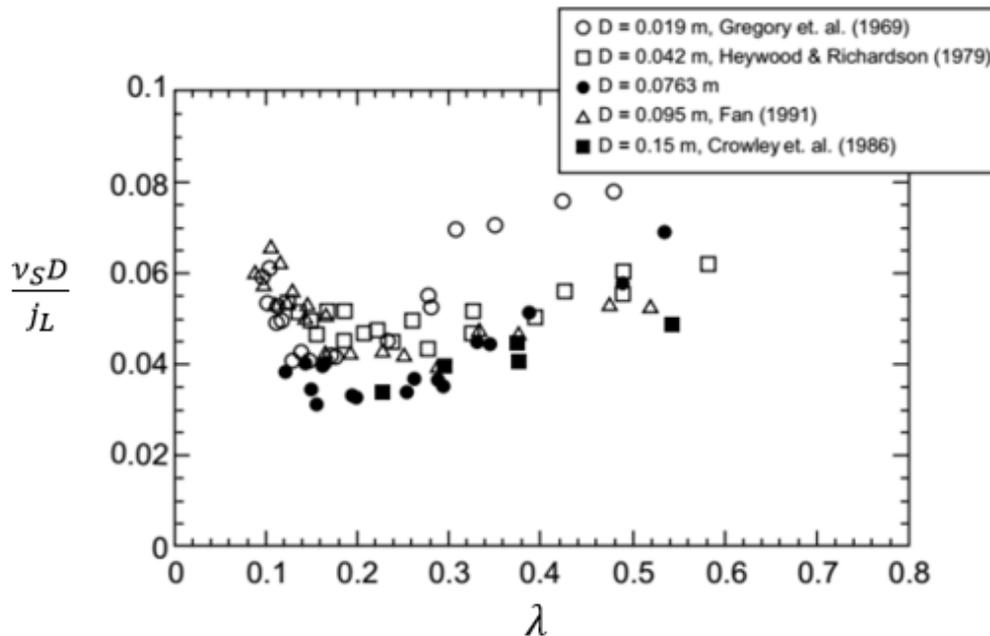


Figura 2-6 – Frequência na forma adimensional para diferentes diâmetros da tubulação (Woods et al. 2006).

É possível observar que a frequência de golfada é, de maneira aproximada, inversamente proporcional ao diâmetro da tubulação e diretamente proporcional à velocidade superficial de líquido.

Um estudo de como a frequência de golfadas é influenciada pela viscosidade do líquido foi o tema do trabalho de Gokcal et al. (2010). Usando óleo mineral e ar como fluidos, os autores concluíram que os modelos já validados para o escoamento intermitente de ar e água não conseguem prever, com perfeição, a frequência de intermitência quando são utilizados líquidos muito viscosos. A partir do número de viscosidade inverso, definido na equação (2.22), onde ρ é a densidade e μ a viscosidade dinâmica, os autores chegaram na correlação exposta na equação (2.23).

$$N_f = \frac{D^{3/2} \sqrt{\rho_L (\rho_L - \rho_G) g}}{\mu_L} \quad (2.22)$$

$$v_s = 2,623 \frac{1}{N_f^{0,612}} \frac{j_L}{D} \quad (2.23)$$

O modelo proposto por Gokcal et al. (2010) foi, dentre diversos modelos já validados para água e ar, o que melhor representou as frequências obtidas para o escoamento intermitente com líquidos altamente viscosos, no trabalho de Farsetti et al. (2014).

2.4.3. Queda de pressão

O gradiente de pressão gerado em um escoamento intermitente é, em geral, maior que quando um único fluido escoar com a mesma vazão mássica e nas mesmas condições. Tal afirmação pode ser explicada pelo fato do pistão líquido viajar, normalmente, com uma velocidade média maior que a da mistura, aumentando a tensão de cisalhamento na parede. Além disso, no caso do escoamento em golfada, existem regiões de elevada turbulência, como a região de recirculação à montante da traseira da bolha de gás, o que aumenta a dissipação viscosa de energia.

Talvez a primeira tentativa de criar métodos para estimar a perda de carga em escoamentos bifásicos gás-líquido tenha sido feita por Lockhart et al. (1949), que analisando dados de perda de pressão do escoamento de diferentes líquidos com ar, desenvolveram uma metodologia que gera uma estimativa do gradiente de pressão baseado na análise de cada fase escoando sozinhas na tubulação.

Conhecidas as velocidades superficiais de cada fase, o gradiente de pressão da fase líquida e da fase gás, assumindo que as mesmas estejam escoando sozinhas na tubulação, devem ser calculadas conforme as equações (2.24) e (2.25).

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_L = \frac{f_L \rho_L j_L^2}{D} \quad (2.24)$$

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_G = \frac{f_G \rho_G j_G^2}{D} \quad (2.25)$$

O fator de atrito de Darcy poderia ser obtido diretamente do ábaco de Moody, porém Lockhart et al. (1949) sugerem as seguintes relações, dependendo se o escoamento hipotético se encontra em regime turbulento ou laminar:

$$f_L = \frac{64}{Re_L}, \text{ se } Re_L < 1000 \quad (2.26)$$

$$f_L = 0,184 Re_L^{-0,2}, \text{ se } Re_L > 2000 \quad (2.27)$$

$$f_G = \frac{64}{Re_G}, \text{ se } Re_G < 1000 \quad (2.28)$$

$$f_G = 0,184 Re_G^{-0,2}, \text{ se } Re_G > 2000 \quad (2.29)$$

Conhecidos os gradientes de pressão hipotéticos calculados pelas equações (2.24) e (2.25), é computado o parâmetro X, conforme a equação (2.30).

$$X = \frac{\left[\left(\frac{dp}{dx}\right)_L\right]^{\frac{1}{2}}}{\left[\left(\frac{dp}{dx}\right)_G\right]} \quad (2.30)$$

Com o parâmetro X, é possível determinarmos Φ_L ou Φ_G , com o auxílio da Figura 2-7. O segundo e o terceiro carácter se referem ao fato do escoamento hipotético de gás e líquido puros, respectivamente, ser laminar ou turbulento.

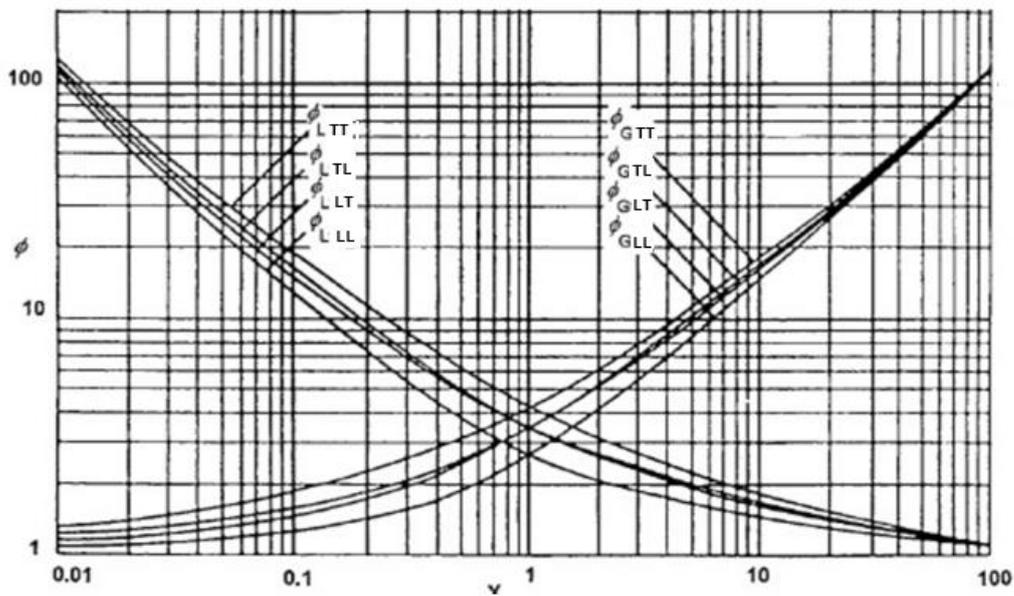


Figura 2-7 – Coeficientes para a correlação da perda de carga pelo modelo de Lockhart-Martinelli. Adaptado de Lockhart et al. (1949).

Finalmente, a perda de carga real na tubulação é determinada a partir da equação (2.31) ou da equação (2.32).

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_M = \Phi_L^2 \left(\frac{dp}{dx}\right)_L \quad (2.31)$$

$$\left(\frac{dp}{dx}\right)_M = \Phi_G^2 \left(\frac{dp}{dx}\right)_G \quad (2.32)$$

Para facilitar a análise da Figura 2-7, Chisholm (1967) ajustou matematicamente as curvas, chegando as equações (2.33) e (2.34).

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (2.33)$$

$$\Phi_G^2 = 1 + CX + X^2 \quad (2.34)$$

Os coeficientes são dados dependendo do regime (laminar ou turbulento), de acordo com a Tabela 2.3

Tabela 2.3 – Coeficientes de Chisholm.

Gás	Líquido	C
Laminar	Laminar	5
Laminar	Turbulento	10
Turbulento	Laminar	12
Turbulento	Turbulento	20

Apesar de bastante utilizada como estimativa inicial, a correlação de Lockhart-Martinelli não leva em consideração o padrão no qual o escoamento se encontra. De acordo com Baker (1953), tal correlação falha para alguns padrões de escoamento e para tubulações com diâmetros internos elevados. Baseado nisso, ele propôs correções no cálculo de Φ_G , dependendo da configuração do escoamento bifásico. No caso do escoamento em golfada, a correção foi proposta quando ambas as fases se encontram no regime turbulento, conforme a equação (2.35), onde L representa a velocidade mássica da fase líquida, em libras por hora por pé quadrado da seção transversal total da tubulação.

$$\Phi_{GTT} = \frac{1190 X^{0,815}}{L^{0,5}} \quad (2.35)$$

Diferentemente do modelo de Lockhart-Martinelli, o modelo desenvolvido por Dukler, et al. (1975) busca estimar a perda de carga na célula unitária. Para isso, os autores desprezam a perda de carga devido ao atrito na região de filme líquido, baseando-se no fato de que esta poderia ser desprezível em comparação a região do pistão líquido. Os autores propuseram que a perda de carga ocorre devido ao atrito do líquido com as paredes da tubulação no pistão e a aceleração do líquido, que se move a baixas velocidades, presente na região de filme líquido logo na frente do

pistão, criando vórtices. Uma representação da perda de carga ao longo de uma unidade de golfada, conforme proposto por Dukler et al. (1975) está exemplificada na Figura 2-8, onde l_m e Δp_m se referem ao comprimento e à perda de carga na região de aceleração do filme líquido, Δp_p se refere à perda de carga no resto do pistão de líquido e Δp_s à perda de carga total na célula unitária.

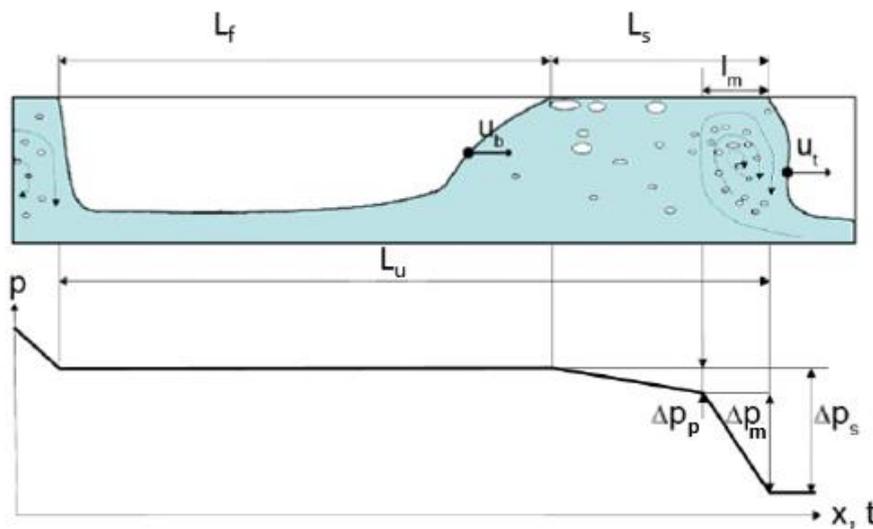


Figura 2-8 - Queda de pressão em uma célula unitária de golfada para o modelo de Dukler et al. (1975). Adaptado de Carpintero-Rogero (2008)

De acordo com Taitel et al. (1990), alguns termos importantes foram negligenciados nos modelos anteriores. Os autores utilizaram um balanço de força na célula unitária para incluir a de perda de carga na região de filme líquido (para o gás e para o líquido), além de melhorar o termo relativo a Δp_m .

Mais recentemente, Cook et al. (2000) criaram um modelo que incorpora as perdas devido a bolhas dispersas no pistão líquido, à expansão do gás. Os autores defendem que a perda de carga ocorre na região de aceleração do filme devido à dissipação viscosa dos vórtices ali formados.

A característica transiente do escoamento em golfada faz com que a pressão em um mesmo ponto oscile, como evidenciado na Figura 2-8. Tal fenômeno pode ser utilizado na detecção do padrão de golfadas, conforme descrito por Lin et al. (1987).

2.4.4. Hold-up na região do pistão líquido

Conforme discutido anteriormente, no escoamento intermitente pode ocorrer a aeração do pistão de líquido por bolhas de gás, geralmente concentradas na parte superior do escoamento, devido à diferença de densidade entre as fases. De maneira geral, a aeração do pistão de líquido é utilizada para distinguir o padrão de bolhas alongadas do padrão de golfadas, conforme discutido na seção 1.1. Apesar do trabalho de Carpintero-Rogero et al. (2006), que utilizou sensores de vazão para tentar estabelecer regiões de transição entre tais regimes, baseado no número de Froude, a literatura continua carente de uma norma que defina um limiar entre esses padrões.

De acordo com Bendiksen, et al. (1996), para elevadas vazões, a distribuição das bolhas de gás ao longo da tubulação é uniforme. Durante as últimas décadas, algumas poucas correlações empíricas foram desenvolvidas para prever o *hold-up* de líquido (Carpintero-Rogero, 2008). Uma das correlações desenvolvidas é a de Gregory et al. (1978), desenvolvida a partir do escoamento de ar e óleo em tubos de 25,8 e 51,2mm de diâmetro interno e mostrada na equação (2.36). A unidade de velocidade da mistura é metros por segundo.

$$\alpha_{LS} = \frac{1}{1 + \left(\frac{j_m}{8,66}\right)^{1,39}} \quad (2.36)$$

Mais recentemente, diversos autores apresentaram correlações mais aperfeiçoadas, incluindo termos como a tensão superficial, densidade, etc. O leitor interessado poderá encontrar algumas dessas relações em Andreussi et al. (1989), Abdul-Majeed et al. (2000) e Cook et al. (2000).

2.4.5. Velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido

De acordo com Carpintero-Rogero (2008), a velocidade das bolhas dispersas no pistão de líquido de um escoamento em golfada foi calculada

por Bonizzi (2003). A partir da força de arraste e da diferença de pressão sobre as bolhas, o autor chegou na equação (2.37), onde D_B é o diâmetro da bolha.

$$u_B = j_m - \sqrt{\frac{-4D_B \left(\frac{dp}{dx}\right)}{3C_d \rho_L}} \quad (2.37)$$

O coeficiente de arraste C_d é dado por:

$$C_d = \frac{\max \left[\frac{24}{Re_B} (1 + 0,15 Re_B^{0,687}), \frac{8}{3} \left(\frac{Eo}{Eo + 4} \right) \right]}{\sqrt{\alpha_{LS}}} \quad (2.38)$$

O número de Reynolds da bolha e o número de Eötvös são definidos de acordo com as equações (2.39) e (2.40), onde σ é a tensão superficial na interface gás-líquido.

$$Re_B = \frac{\rho_L D_B |j_m - u_B|}{\mu_L} \quad (2.39)$$

$$Eo = \frac{g(\rho_L - \rho_G) D_B^2}{\sigma} \quad (2.40)$$

2.4.6. Comprimento da bolha alongada

O comprimento da bolha alongada no escoamento intermitente não é um assunto tão discutido como o comprimento do pistão de líquido, possivelmente por este ser utilizado diretamente nos modelos estacionários. Apesar disso, este tema foi discutido em alguns trabalhos encontrados na literatura.

Utilizando uma tubulação de 50mm de diâmetro interno, Wang et al. (2007) estudaram o comprimento da alongada, chegando à conclusão que esta aumenta com o aumento da velocidade superficial do gás e diminui

com o aumento da velocidade superficial do líquido, conforme ilustrado na Figura 2-9.

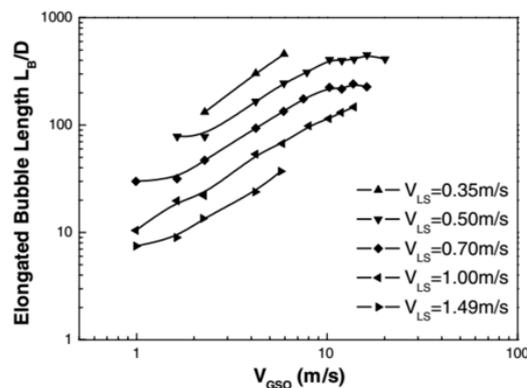


Figura 2-9 – Comprimento médio da bolha alongada em função da velocidade superficial de gás Wang et al. (2007).

Os dados estatísticos obtidos por Carneiro et al. (2011) também corroboram a afirmação que o comprimento da bolha alongada diminui com o aumento da velocidade superficial do líquido.

2.4.7. Velocidade de translação da bolha alongada

A velocidade de translação da bolha alongada é um fenômeno bastante estudado, principalmente para o caso vertical, onde a simetria do escoamento facilita o estudo (Carpintero-Rogero, 2008).

Grande parte dos experimentos são executados com uma única bolha alongada se propagando em líquido, como fizeram Nicklin et al. (1962) para o caso vertical, chegando na equação (2.41), onde C_o é uma constante e u_d a velocidade de deslizamento da fase gás em relação à fase líquido (ou a velocidade de ascensão da bolha em líquido estagnado).

$$u_b = C_o u_L + u_d \quad (2.41)$$

De acordo com Carpintero-Rogero (2008), quando o escoamento é completamente desenvolvido as bolhas de gás mantêm um tamanho

constante, o que implica na velocidade da cauda da bolha (u_T) ser igual à velocidade do nariz da bolha (u_b).

A partir dos estudos de Nicklin et al. (1962), diversos autores entenderam que, para o caso horizontal, a velocidade de deslizamento não deveria ser considerada, visto que esta ocorreria apenas devido à gravidade. Baseado nisso, Gregory et al. (1969) propuseram a seguinte relação para escoamento horizontal:

$$u_b = 1,35j_m \quad (2.42)$$

Na mesma lógica de não considerar a velocidade de deslizamento, porém considerando que Co não é mais uma constante, Dukler et al. (1975) chegaram na seguinte relação:

$$u_T = [1 + (0,021 \ln(Re_S) + 0,022)]j_m \quad (2.43)$$

$$Re_S = \frac{(\alpha_{GS}\rho_G + \alpha_{LS}\rho_L)j_m D}{\alpha_{GS}\mu_G + \alpha_{LS}\mu_L} \quad (2.44)$$

A partir dos dados de um experimento com óleo e ar, Nicholson et al. (1978) afirmaram que a relação proposta por Dukler et al. (1975) não estava completa, pois a velocidade de deslizamento não pode ser desprezada. De acordo com os autores, tal velocidade existe como consequência da pressão estática, que ocorre devido ao diâmetro da tubulação. Tal efeito é maior, portanto, para tubulações de diâmetros elevados. As seguintes relações foram propostas:

$$u_T = 1,196j_m + 0,27 \quad \text{para } D = 25,8\text{mm} \quad (2.45)$$

$$u_T = 1,128j_m + 0,28 \quad \text{para } D = 51,2\text{mm} \quad (2.46)$$

Analisando as equações (2.45) e (2.46) é fácil observar que os valores são diferentes para os dois diâmetros estudados. De acordo com Zukoski (1966), a velocidade de deslizamento é dependente de números adimensionais como o número de Eötvös, o número de viscosidade inverso, definido na equação (2.22), e da inclinação da tubulação (θ). A equação resultante assumiria, portanto, a forma da equação (2.47).

$$u_T = C_o j_M + C_\infty (N_f, Eo, \theta) \sqrt{gD} \quad (2.47)$$

Diversos autores afirmaram que as mudanças nos coeficientes estão associadas à competição entre a força gravitacional e as forças de inércia. Bendiksen (1984) utilizou o número de Froude, definido na equação (2.20) para quantificar esta disputa.

Bendiksen (1984) percebeu que existe uma transição nos coeficientes C_o e C_∞ , dada pelo número de Froude, e que este varia com a inclinação da tubulação. A partir dos dados que ele obteve e, para o caso horizontal, é comum encontrar na literatura a seguinte relação:

$$u_B = 1,05 j_m + 0,54 \sqrt{gD} \quad \text{para } Fr < 3,5 \quad (2.48)$$

$$u_B = 1,2 j_m \quad \text{para } Fr > 3,5 \quad (2.49)$$

Mais recentemente, Hurlburt et al. (2002) usaram os dados experimentais de Woods et al. (1996) para propor mais uma divisão nas regiões do número de Froude usadas nas equações (2.48) e (2.49). De acordo com os autores, para $Fr < 2$ os efeitos gravitacionais predominam sobre os de inércia. Para $2 < Fr < 3,5$ ambos os efeitos gravitacionais e de inércia são importantes, enquanto para $Fr > 3,5$ os efeitos de inércia são dominantes. As equações propostas pelos autores estão ilustradas abaixo:

$$u_B = 1,0j_m + 0,542\sqrt{gD} \text{ para } Fr < 2 \quad (2.50)$$

$$u_B = 1,01 + 0,542\sqrt{gD} \text{ para } 2 < Fr < 3,5 \quad (2.51)$$

$$u_B = 1,2j_m \text{ para } Fr > 3,5 \quad (2.52)$$

Claramente ainda são necessários muitos estudos para esclarecer perfeitamente a velocidade de translação de bolhas alongadas, fator este, muito importante no desenvolvimento de modelos precisos do escoamento em golfada. Apesar do caso vertical já estar mais elucidado, o caso horizontal e inclinado ainda estão longe de serem plenamente compreendidos (Woods et al., 1996).

2.5. Modelagem do escoamento em golfada

Conforme discutido nas sessões anteriores, o escoamento intermitente possui características distintas dos outros padrões de escoamento gás-líquido. É importante, portanto, que existam modelos matemáticos que consigam prever as principais grandezas de interesse associadas a este padrão de escoamento, para que o engenheiro possa dimensionar corretamente as tubulações e equipamentos que farão parte do processo.

De acordo com Carpintero-Rogero (2008), os modelos existentes para descrever matematicamente o escoamento em golfada podem ser divididos em modelos estacionários (*Steady-State Models*) e modelos transientes, que serão descritos adiante.

2.5.1. Modelos estacionários

Apesar do escoamento intermitente ter natureza transiente, devido à intermitência entre golfada líquida e bolha de gás, é possível utilizar o conceito de célula unitária (ver Figura 2-1), proposto inicialmente por Wallis

(1969) e aprimorado por Dukler et al. (1975) para descrever tal escoamento como em regime permanente. Neste tipo de modelagem, o referencial torna-se lagrangeano, movendo-se na mesma velocidade que a célula unitária.

Nesta descrição, todas as células unitárias são idênticas, com o mesmo comprimento, frequência e velocidade. O modelo proposto por Dukler et al. (1975) permite o cálculo do gradiente de pressão por célula unitária, porém, por ser um modelo simples, depende diretamente das chamadas equações de fechamento, relações entre as grandezas descritas na seção 2.2.2, que geralmente são fornecidas a partir de dados experimentais. Diversas destas relações utilizadas são as descritas na seção 2.4, como as relações para velocidade de translação das bolhas alongadas, fração de vazio, etc.

Os modelos estacionários são simples e fáceis de usar, porém, apesar de aprimorados por Taitel et al. (1990) e Cook et al. (2000), não são capazes de descrever detalhadamente o escoamento intermitente, dadas as simplificações utilizadas. Para solucionar tal problema, foram desenvolvidos os modelos transientes (Carpintero-Rogero, 2008).

2.5.2. Modelos transientes

Os modelos transientes são baseados, normalmente, na solução da equação de Navier-Stokes. Serão descritas duas abordagens numéricas, como descrito em detalhes por Nieckele (2010). Na primeira, as equações são resolvidas diretamente, demandando alto esforço computacional. É o chamado modelo de “um fluido”. A segunda metodologia consiste no uso de descrições médias, que diminuem o tempo de processamento e tornam viável a aplicação para dutos longos.

2.5.2.1. Modelo de um fluido

O modelo de um fluido se baseia na solução direta de um único conjunto de equações de conservação de massa e quantidade de

movimento, desde que os fluidos sejam imiscíveis Soria (2009). Para implementar tal metodologia, a interface deve ser identificada de alguma maneira. Um modelo comum é o chamado *Volume of Fluid* (VOF), no qual uma malha fixa é utilizada e uma função marcadora determina a posição da interface.

As diferentes propriedades características dos fluidos são incluídas no sistema com o auxílio da função de Heaviside (função degrau), integrada sobre o espaço, que passa a representar a fração volumétrica (ou fração de área, para escoamento 2D) em uma determinada região da malha. Esta é a função marcadora, que tem sua propagação modelada no decorrer do escoamento a partir de algum algoritmo de advecção, como o proposto por Gueyffier et al. (1999).

O modelo VOF é utilizado em diversos softwares comerciais de dinâmica dos fluidos computacional, como no FLUENT™ da ANSYS.

2.5.2.2.

Modelos baseados na descrição média das equações de conservação

Em diversas situações, a solução direta da equação de Navier-Stokes a partir do modelo de um fluido requer um esforço computacional muito elevado, não sendo viável sua utilização. Como solução a este problema, existem os modelos baseados na descrição média das equações de conservação. Em tais modelos, as grandezas pertinentes ao problema são tomadas como médias no espaço, o que simplifica significativamente a solução do problema.

Dentre os modelos que se enquadram nesta categoria estão o modelo homogêneo, o modelo de deslizamento e o modelo de dois fluidos, este último sendo utilizado em softwares comerciais como o LEDA™ e o OLGA™ (Laurindo, 2012). Em todos estes modelos, a abordagem unidimensional introduz simplificações nas equações de conservação, o que faz com que relações de fechamento baseadas em dados empíricos se tornem necessárias. A tensão de cisalhamento, por exemplo, não pode mais ser fornecida a partir da derivada da velocidade.

Outros modelos transientes também são encontrados na literatura, como o modelo de *Slug Tracking* e alguns modelos baseados puramente em dados empíricos (Carpintero-Rogero, 2008).

Particularizando para o modelo de dois fluidos unidimensional, Issa et al. (2003) recomendam que a tensão de cisalhamento seja calculada a partir das equações (2.53), (2.54) e (2.55), onde o subscrito w indica que a região é de parede e o subscrito i de interface.

$$\tau_{wL} = \frac{f_L}{2} \rho_L u_L |u_L| \quad (2.53)$$

$$\tau_{wG} = \frac{f_G}{2} \rho_G u_G |u_G| \quad (2.54)$$

$$\tau_i = \frac{f_i}{2} \rho_G (u_G - u_L) |u_G - u_L| \quad (2.55)$$

Ainda de acordo com Issa et al. (2003), o fator de atrito sugerido para cada caso está ilustrado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Correlações para o fator de atrito, conforme sugerido por Issa et al. (2003)

	Regime Laminar	Regime Turbulento
f_L	$24/Re_{sL}$	$0,0262(\alpha_L Re_L)^{-0,139}$
f_G	$16/Re_G$	$0,046(Re_G)^{-0,2}$
f_i	$16/Re_i$	$0,046(Re_i)^{-0,2}$

Os números de Reynolds para cada caso na tabela acima estão expostos nas equações (2.56), (2.57) e (2.58), onde S denota o perímetro e A denota a área transversal.

$$Re_G = \frac{4A_G u_G \rho_G}{(S_G + S_i) \mu_G} \quad (2.56)$$

$$Re_i = \frac{4A_G |u_G - u_L| \rho_G}{(S_G + S_i) \mu_G} \quad (2.57)$$

$$Re_L = \frac{D j_L \rho_L}{\mu_L} \quad (2.58)$$

Relações como as ilustradas para o fator de atrito, podem ser melhoradas com dados empíricos. É esperado que este trabalho possa contribuir para a melhoria ou validação de modelos como os descritos acima.

3

Técnicas experimentais

Neste Capítulo serão descritas as técnicas experimentais utilizadas na obtenção dos dados que serão apresentados no capítulo 7. Assim como no capítulo 2, o leitor já familiarizado com as técnicas de PIV estereoscópico, fluorescência induzida por laser e sistema de interruptores de feixe é encorajado a pular este capítulo e seguir para o capítulo 4.

3.1.

Introdução às técnicas experimentais

A determinação do campo de velocidades em um determinado escoamento é uma informação fundamental para a compreensão dos mecanismos físicos que governam tal fenômeno. Somado a isso, o campo de velocidades pode ser utilizado na determinação de diversas grandezas de interesse, como a tensão de cisalhamento e a vorticidade, além de ser utilizado na validação de metodologias numéricas.

As técnicas mais tradicionais de medição de velocidade são as chamadas sondas pontuais, com destaque para o anemômetro de fio/filme quente e o anemômetro de laser-Doppler Goldstein (Goldstein, 1996). Tais técnicas apesar de possuírem uma alta precisão, medem a velocidade apenas em um determinado ponto por vez, não sendo capaz de determinar o campo de velocidades em uma região. Apesar de existirem trabalhos na literatura que utilizam diversas sondas para determinar simultaneamente a velocidade em diversos pontos, como o de Tutkun et al. (2009), a complexidade aliada ao custo do experimento e, dependendo do caso, à perturbação causada no escoamento tornam essa alternativa pouco vantajosa (Abrantes et al., 2012).

A alternativa às técnicas de medição pontual são as de medição de óptica de campo completo. Tais técnicas são baseadas na determinação

do deslocamento de partículas que são colocadas no escoamento. Quando a concentração de tais partículas é baixa, o vetor velocidade é determinado a partir do deslocamento de cada uma delas e a técnica é chamada de *Particle Tracking Velocimetry* (PTV). Quando a concentração é alta, a utilização de lasers para iluminar as partículas forma *speckles*. A partir do deslocamento dos *speckles*, o vetor velocidade é determinado. Nesse caso, a técnica passa a se chamar *Laser Speckle Velocimetry* (LSV). A prática, porém, demonstrou que a técnica que obtém melhor resolução é a chamada *Particle Image Velocimetry* (PIV), ou Velocimetria por Imagem de Partículas, na qual a concentração de partículas é intermediária entre a técnica PTV e a LSV. O vetor velocidade é determinado a partir do deslocamento médio de um grupo de partículas.

As técnicas de campo completo possuem uma grande vantagem em relação as técnicas pontuais, pois com o conhecimento do campo de velocidades é possível determinar a derivada da velocidade no espaço. Com isso, grandezas importantes como o vetor vorticidade, a taxa de dissipação viscosa e a tensão de cisalhamento podem ser determinadas (Raffel et al., 2007).

Pelos motivos descritos acima, a técnica de PIV (mais especificamente, de PIV estereoscópico) foi escolhida para determinar o campo de velocidades tridimensional neste trabalho. Como a técnica de PIV longitudinal (ou PIV tradicional) já foi bastante explorada, será feita apenas uma breve revisão nas próximas páginas, abrindo espaço para um detalhamento maior da técnica de PIV estereoscópico. Serão mencionadas brevemente também as outras formas de PIV existentes, que foram desenvolvidas nas últimas décadas, como o PIV tomográfico e o PIV holográfico. O leitor mais interessado poderá encontrar mais informações em Raffel et al. (2007) e em Adrian et al. (2011). No final do capítulo será discutida a técnica chamada de Fluorescência Induzida por Laser – LIF (*Laser Induced Fluorescence*), que explica o funcionamento das partículas fluorescentes, importantes na utilização da técnica de PIV em escoamento gás-líquido, e o funcionamento do sistema de interruptores de feixes.

3.2. Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)

A técnica de PIV funciona a partir da determinação do deslocamento médio de partículas traçadoras presentes no escoamento. Tais partículas devem ser escolhidas de modo a serem pequenas o suficiente para seguirem fielmente o escoamento e grandes o suficiente para espalharem luz e, conseqüentemente, facilitarem a determinação de sua posição. Como o PIV já é uma técnica consolidada e utilizada no mundo inteiro, tais características das partículas, apesar de antagônicas, já estão satisfeitas.

Para utilizar a técnica de PIV, é necessário um sistema de iluminação, um sistema de aquisição de imagens e um sistema de sincronização, que serão descritos adiante.

O sistema de iluminação é formado por uma fonte de geração de luz e um jogo de lentes. De acordo com Raffel et al. (2007), laser é geralmente utilizado como fonte de geração de luz, pois é capaz de gerar luz monocromática em intervalos de tempo bem definidos e com alta potência. Outras fontes de luz que podem ser utilizadas em alguns casos são LED (*Light Emitting Diode*) e lâmpada de xênon, que apresentam como vantagem o fato de serem mais baratas e mais seguras que o laser, justamente por gerarem luz com menos energia (Abrantes, et al., 2012). O jogo de lentes tem como função gerar um plano de iluminação de espessura e tamanhos definidos, que será a região onde o escoamento será avaliado.

O sistema de aquisição de imagem é formado por uma ou mais câmeras, dependendo de qual técnica de PIV está sendo utilizada. Normalmente são utilizadas câmeras digitais com sensores do tipo CCD (*Charge-Coupled Device*), que tem seu funcionamento baseado no efeito fotoelétrico, onde a luz incidente sobre um sensor eletrônico é convertida em elétrons, que são armazenados dentro do mesmo. O conjunto do sensor com a região de armazenamento é denominado pixel (*picture element*). Um sensor CCD possui milhares de pixels e é o tempo de transferência dos elétrons para a região de armazenamento que dita a frequência que uma câmera pode operar. Em câmeras com altas taxas de aquisição

normalmente são utilizados sensores CMOS (*Complementary metal-oxide semiconductor*), que têm como grande diferencial o fato de cada pixel conter um circuito eletrônico próprio. Nessas câmeras, a resolução pode variar em função da taxa de aquisição.

O sistema de sincronização é formado por um sincronizador, que através de um computador, controla o laser e a câmera. Com o sincronizador, é possível garantir que o laser dispare quando a câmera está aberta, em intervalos de tempo pré-definidos. A Figura 3-1 ilustra o princípio de funcionamento da técnica de PIV. Com os sistemas descritos anteriormente funcionando, são obtidas duas imagens com intervalo de tempo conhecido. Tais imagens são divididas em diversas regiões, denominadas janelas de interrogação. A partir de técnicas de correlação cruzada, é possível determinar o deslocamento de padrões de partículas, contidos nas janelas de interrogação da primeira e da segunda imagem. Como o intervalo de tempo é conhecido, cada janela de interrogação pode ser transformada em um vetor velocidade. As informações obtidas podem ser analisadas para determinar, então, grandezas de interesse no escoamento.

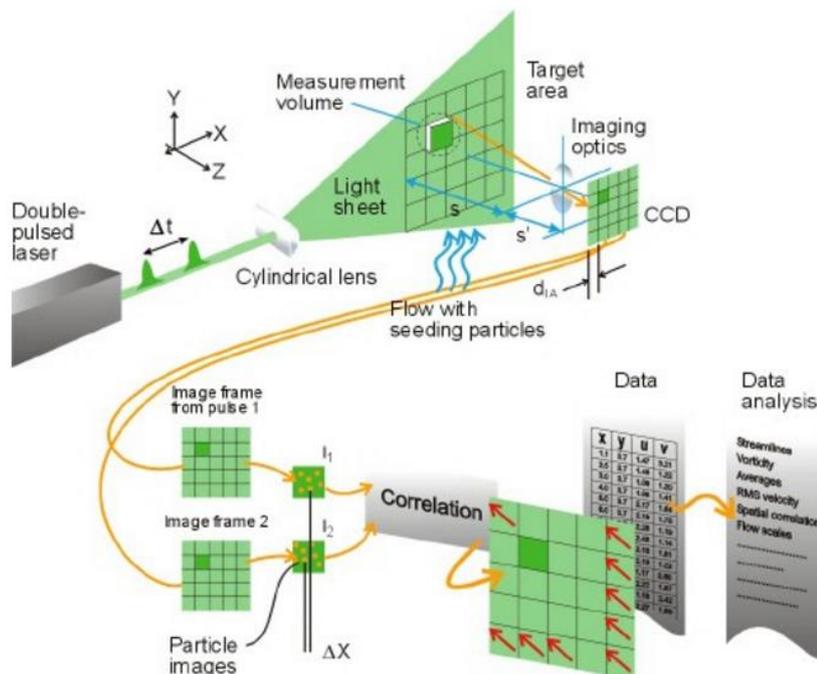


Figura 3-1 – Princípio de funcionamento da técnica de PIV (fonte: <http://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>)

Apesar de teoricamente simples, o processamento das imagens requer cuidados, de modo a garantir que o campo vetorial gerado corresponda à realidade física do problema. Os processos que envolvem a determinação do deslocamento da janela de interrogação, após a aquisição das imagens são divididas em pré-processamento, processamento e pós-processamento e, por serem etapas críticas, serão descritas com maiores detalhes nas próximas páginas.

3.2.1. Pré-processamento

O objetivo do pré-processamento é simplesmente de melhorar a qualidade das imagens, de modo a favorecer a correlação cruzada. Em PIV, isso significa melhorar a visualização das partículas traçadoras, que são muitas vezes ofuscadas por ruídos, luz de fundo e até mesmo algumas partículas que podem estar espalhando muita luz (Raffel et al., 2007). Ao longo das últimas décadas foram desenvolvidas diversas técnicas de pré-processamento.

É provável que a técnica de pré-processamento mais simples seja a de subtração da imagem de fundo, a partir de uma imagem do escoamento na ausência de partículas, de uma média a partir de diversas imagens ou de uma imagem obtida através do mínimo de uma série de imagens. É um procedimento de fácil aplicação e que pode melhorar significativamente a qualidade das imagens (Abrantes et al., 2012).

Em alguns casos, porém, a remoção da imagem de fundo não é suficiente para atingir a qualidade de imagem desejada e técnicas mais elaboradas devem ser utilizadas, como a utilização de filtro passa-baixa ou passa-alta. Tal técnica busca diminuir a influência de partículas muito ou pouco iluminadas no resultado da correlação cruzada, buscando equalizar a intensidade de cada partícula. A dificuldade está em determinar a faixa de corte, pois informações relevantes podem ser perdidas caso esta etapa não seja executada com cuidado.

Existem também métodos que buscam normalizar a intensidade de iluminação de cada partícula a partir da comparação de amostras da imagem com valores médios globais (Abrantes, et al., 2012).

Por alterar artificialmente as imagens, o pré-processamento deve ser executado cuidadosamente pelo usuário, caso contrário, podem ser obtidas informações que não representam a física do fenômeno estudado.

3.2.2. Processamento das imagens

Como descrito anteriormente, o processamento das imagens se resume a utilizar a técnica estatística de correlação cruzada entre duas imagens. Tal técnica consiste em deslocar a janela de interrogação da primeira imagem sobre uma região definida na segunda imagem. O somatório do produto da intensidade de luz de cada pixel da janela da primeira imagem, I_1 , com cada pixel de uma região na segunda imagem, I_2 , é a correlação entre tais imagens em um determinado ponto. Estas intensidades são previamente subtraídas da intensidade média da janela, Im_i . A equação (3.1) mostra a fórmula utilizada no processo.

$$R_{I_1 I_2}(x, y) = \sum_i \sum_j (I_1(i, j) - Im_1)(I_2(i + x, j + y) - Im_2) \quad (3.1)$$

Onde i e j são os índices das linhas e colunas referentes ao pixel das duas janelas.

A Figura 3-2 ilustra um exemplo de resultado obtido pela correlação cruzada de duas janelas para cada deslocamento avaliado.

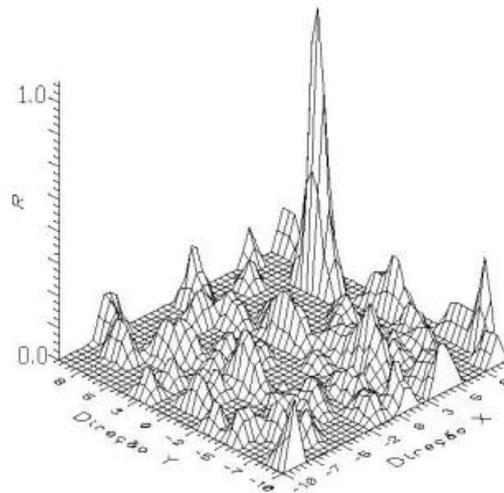


Figura 3-2 – Típico resultado de correlação cruzada. Fonte: Almeida (1997).

O deslocamento da janela de interrogação pode ser determinado a partir do pico de correlação, porém, como as imagens são formadas por pixels, elas são representadas na forma discreta, e não na forma contínua. O pico de correlação pode, portanto, não representar exatamente o deslocamento da janela. Para resolver esse problema, e conseguir uma resolução sub-pixel na determinação do deslocamento, foram desenvolvidos métodos de interpolação. Os mais comuns são os ajustes através de uma parábola, do centroide e da gaussiana, que utilizam as intensidades da correlação cruzada na região próxima ao pico para obter uma resolução que pode chegar a 0,05 pixel (Raffel et al., 2007). A Figura 3-3 mostra a intensidade da correlação na região próxima ao ponto de correlação máxima para diferentes deslocamentos sub-pixel.

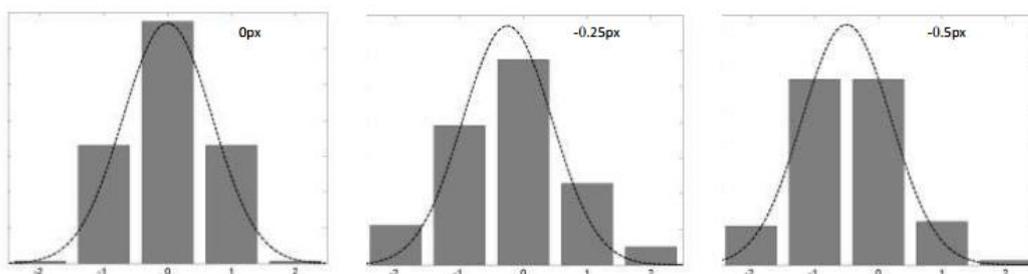


Figura 3-3 – Comportamento na região próxima ao pico de correlação para diferentes deslocamentos. Fonte: Abrantes et al. (2012).

Para tornar o processo de correlação mais rápido, é comum o uso de algoritmos baseados na Transformada Rápida de Fourier, ou *Fast Fourier Transform* (FFT). Tal procedimento é baseado no fato que o produto conjugado da transformada de Fourier na forma complexa, de duas funções, é equivalente à correlação cruzada das mesmas. Tal procedimento requer menos capacidade computacional e é uma alternativa bastante utilizada ao invés do cálculo direto pela equação (3.1).

3.2.3. Pós-processamento

O pós-processamento é a última etapa a ser executada na técnica de PIV, consistindo basicamente na validação dos vetores gerados e no preenchimento de espaços vazios que possam existir.

É comum existirem, após a correlação cruzada, vetores de velocidade discrepantes, denominados espúrios, que devem ser removidos. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos algoritmos baseados na média global, mediana normalizada, média dinâmica, etc. A escolha do método a ser utilizado deve ser feita com cuidado, para evitar a remoção excessiva de vetores e, conseqüentemente, a perda de informações importantes (Raffel et al., 2007).

Outra etapa importante no pós-processamento é o preenchimento dos espaços do domínio que não contém vetores, seja porque foram removidos durante a validação por serem espúrios ou porque o deslocamento não pode ser estimado através do algoritmo de correlação cruzada, devido à baixa relação sinal-ruído. É comum utilizar métodos de interpolação com os vetores vizinhos para preencher estes espaços vazios, o que deve ser executado com cuidado, pois tal informação é artificialmente imposta no campo vetorial. De maneira geral, quando o número de vetores substituídos não ultrapassa 5% do total de vetores e estes não são substituídos em regiões conectadas, a substituição é considerada adequada (Abrantes et al., 2012).

3.3. PIV Estereoscópico

A técnica de PIV Estereoscópico (ou *Stereo-PIV*, SPIV) difere da técnica tradicional descrita acima pois esta é capaz de medir os 3 componentes do vetor velocidade em um plano. É o chamado 2D-3C (3 componentes em um plano 2D), enquanto a técnica longitudinal é 2D-2C.

O PIV estereoscópico funciona de maneira semelhante ao olho humano, onde os dois olhos geram duas imagens diferentes do mesmo objeto, combinadas pelo cérebro para gerar a noção de profundidade. No caso do SPIV, duas câmeras geram dois pares de imagens, que combinados matematicamente produzem todos os componentes do vetor velocidade. Para determinar as 3 componentes do vetor velocidade é necessário o conhecimento dos deslocamentos Δx , Δy e Δz dos padrões formados pelas partículas nas janelas de interrogação. Uma única imagem, porém, só é capaz de gerar duas equações, insuficientes para resolver um sistema com 3 incógnitas. A segunda imagem insere mais 2 equações no sistema, o que pode ser utilizado para a reconstrução tridimensional (Prasad, 2000). A Figura 3-4 ilustra um exemplo de imagem obtida com a técnica de PIV estereoscópico.

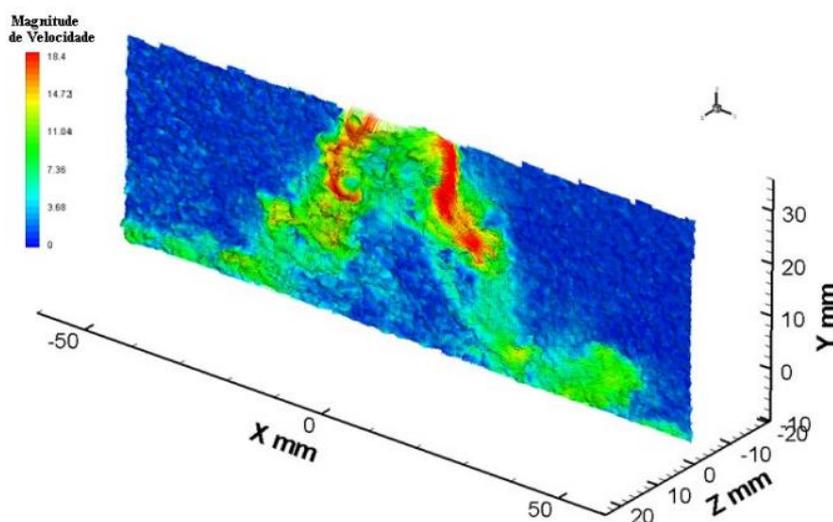


Figura 3-4 - Medida com PIV estereoscópico do campo de velocidades em um jato espiralado (Abrantes et al., 2012).

Nas próximas páginas será feita uma descrição da técnica de SPIV. Será discutido o princípio de funcionamento da mesma, a configuração utilizada e o processo reconstrução, este responsável por gerar os deslocamentos tridimensionais em um plano.

3.3.1. Vantagens em relação a técnica longitudinal

Além da vantagem óbvia da técnica de SPIV medir as 3 componentes do vetor velocidade, uma outra vantagem em relação ao PIV clássico merece ser mencionado. Apesar da técnica longitudinal gerar um campo vetorial em duas dimensões, em alguns casos pode existir um erro considerável devido ao terceiro componente, que não é medido, principalmente quando este possui uma magnitude considerável. Tal fato ocorre, pois, a medição é feita em um plano de laser com uma determinada espessura, que pode ocasionar um erro de perspectiva, conforme ilustrado na Figura 3-5.

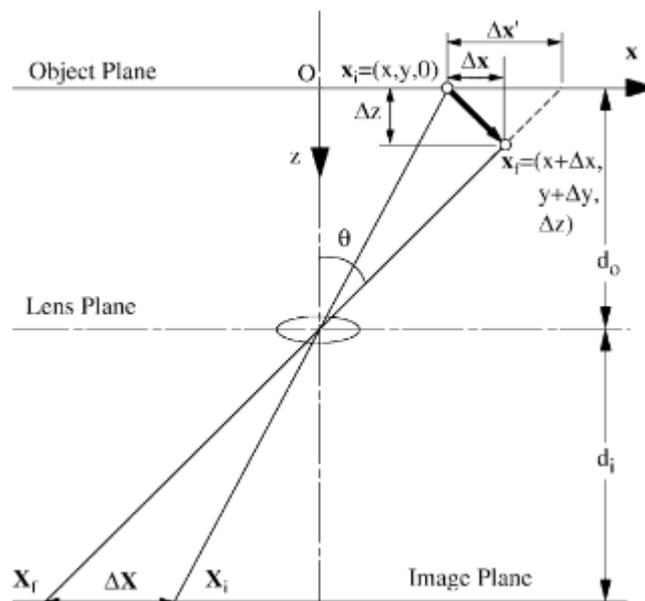


Figura 3-5 - Erro ocasionado pelo deslocamento da partícula na direção do terceiro componente na técnica de PIV longitudinal (Prasad, 2000).

Apesar do deslocamento real ser Δx , devido ao deslocamento na direção z , a imagem vê o deslocamento da partícula como $\Delta x'$, representado no plano da imagem por ΔX .

Em escoamentos onde o componente para fora do plano medido é significativo, esse fenômeno pode gerar erros consideráveis, que podem ser eliminados com a técnica de PIV estereoscópico. A segunda imagem gerada do escoamento é combinada com a primeira de maneira a corrigir os deslocamentos observados por apenas uma imagem e, ao mesmo tempo, gerar o terceiro componente da velocidade.

3.3.2. Configurações do SPIV

As configurações da técnica de PIV estereoscópico dizem respeito à organização das câmeras, que devem estar sempre dispostas de modo a captar duas imagens do mesmo ponto do escoamento, mas por diferentes perspectivas. De acordo com (Prasad, 2000), as montagens podem ser classificadas em sistemas de translação ou de rotação.

Antes de descrever a diferença entre os sistemas mencionados acima, é importante a introdução do conceito de magnificação. A magnificação (M) é a relação entre o tamanho real de um objeto e o tamanho registrado na imagem, conforme a equação (3.2), onde as distâncias da imagem à lente, d_i , e do objeto à lente, d_o , são as ilustradas na Figura 3-5.

$$M = \frac{d_i}{d_o} \quad (3.2)$$

Nos sistemas de translação, as câmeras são montadas paralelas e na mesma distância do plano do objeto. É uma configuração extremamente simples, conforme ilustrado na Figura 3-6, que possui a vantagem de ter a magnificação igual em todos os pontos da imagem. A principal desvantagem está no fato de existir um limite superior para o ângulo θ ,

acima do qual a lente das câmeras funciona fora das especificações para as quais foram fabricadas. O problema surge, pois, o erro na medição da terceira componente, para fora do plano, diminui com o aumento do ângulo θ . É possível afirmar, portanto, que a exatidão da medida é limitada na configuração de translação (Prasad, 2000).

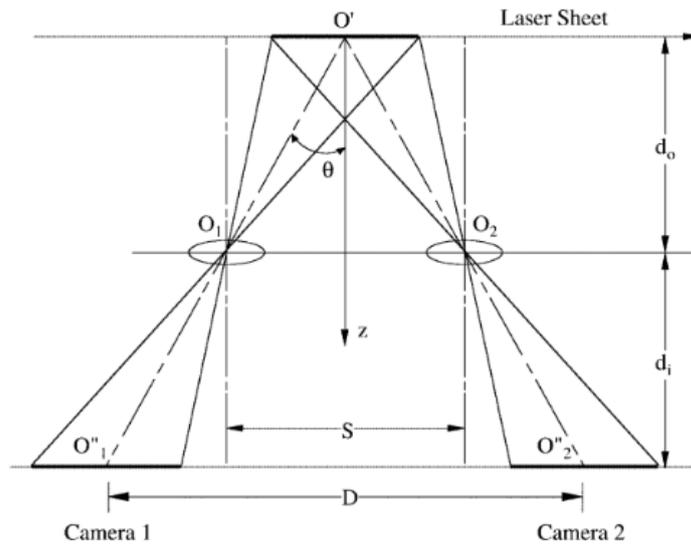


Figura 3-6 - Disposição das câmeras na configuração de translação (Prasad, 2000)

Em oposição à configuração de translação, na de rotação as câmeras não estão mais posicionadas paralelas entre si, o que acaba com o problema relacionado ao ângulo θ , conforme ilustrado na Figura 3-7.

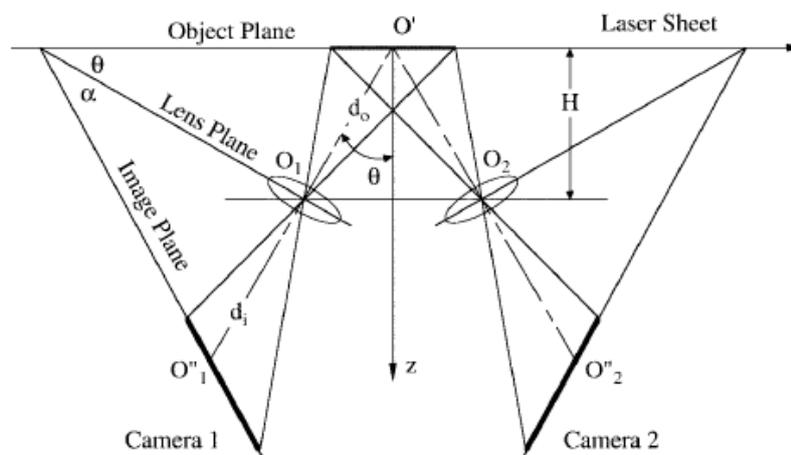


Figura 3-7 – Disposição das câmeras na configuração de rotação. (Prasad, 2000).

Nesta configuração, o plano da imagem, do objeto e da lente devem se interceptar em um mesmo ponto, de maneira a satisfazer o que é conhecido como critério de Scheimpflug, que garante que toda a imagem estará em foco. Deve existir, portanto, um ângulo α entre o plano da imagem e o da lente, e o ângulo θ passa a representar, o ângulo entre o plano da lente e do objeto, conforme a Figura 3-7.

Os sistemas de rotação permitem aumentar o ângulo θ , melhorando a exatidão das medições. O custo de se utilizar esta configuração é que a magnificação deixa de ser constante ao longo da imagem. É definida, então, a magnificação normal (M_n), como a magnificação no centro do objeto. Para a configuração de Scheimpflug, esta pode ser definida de acordo com a equação (3.3).

$$M_n = \frac{\tan \alpha}{\tan \theta} \quad (3.3)$$

A Figura 3-8 ilustra a variação da magnificação ao longo do plano do objeto para um ângulo θ de 30 graus e magnificação normal variando entre 0,2 a 1,0.

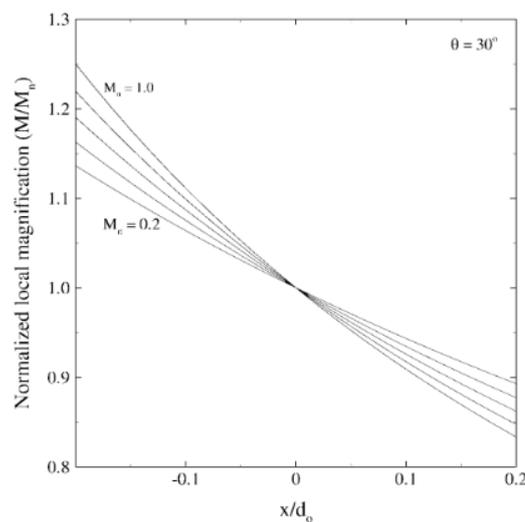


Figura 3-8 – Variação da magnificação ao longo do plano do objeto para o critério de Scheimpflug (Prasad, 2000).

A melhor exatidão existente no sistema rotacional fez com que esta configuração fosse escolhida para ser utilizada neste trabalho.

3.3.3. Calibração e geração do vetor tridimensional

Como discutido anteriormente, como o plano da imagem e do objeto não são paralelos na configuração de rotação, a magnificação não é constante ao longo da imagem e, conseqüentemente, esta encontra-se distorcida em relação ao plano de medição.

Existem na literatura diversas metodologias para corrigir o problema de distorção da imagem. Dentre as várias técnicas citadas por Prasad (2000) para compensar este problema, neste trabalho foi escolhida a metodologia baseada na calibração 3D, que tem como vantagem o fato de não necessitar de conhecimentos prévios da geometria do sistema. Para isso, um alvo com diversos pontos com espaçamentos conhecidos é introduzido na região de medição. Com a aquisição de dados em ao menos 3 planos na imagem, é possível gerar uma função de mapeamento, capaz de distorcer a imagem. A equação (3.4) mostra a função de mapeamento proposta por Soloff et al. (1997). Aqui as coordenadas serão escritas com letra maiúscula quando referidas à imagem e em letra minúscula quando referidas a posição no espaço.

$$\begin{aligned}
 X^i, Y^i = & a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5xy + a_6y^2 + a_7xz \dots \\
 & + a_8yz + a_9z^2 + a_{10}x^3 + a_{11}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{13}y^3 \dots \quad (1) \\
 & + a_{14}x^2z + a_{15}xyz + a_{16}y^2z + a_{17}xz^2 + a_{18}yz^2
 \end{aligned}$$

Os coeficientes “a” são determinados a partir do método dos mínimos quadrados, sendo gerados 4 coeficientes de cada, um para cada coordenada, X ou Y, de cada câmera. Assim, o índice “k” pode valer 1 ou 2, representando câmera 1 ou câmera 2, enquanto o índice “i” pode representar a coordenada X ou a coordenada Y. Apesar da dependência no termo z ser quadrática, na equação (3.4), se forem utilizados mais

planos de calibração, esta pode ser de ordem mais elevada, e se, ao contrário, forem utilizados apenas 2 planos, o termo z será de primeira ordem. A Figura 3-9 ilustra um típico alvo de calibração antes e após a distorção efetuada por uma função de mapeamento similar à equação (3.4).

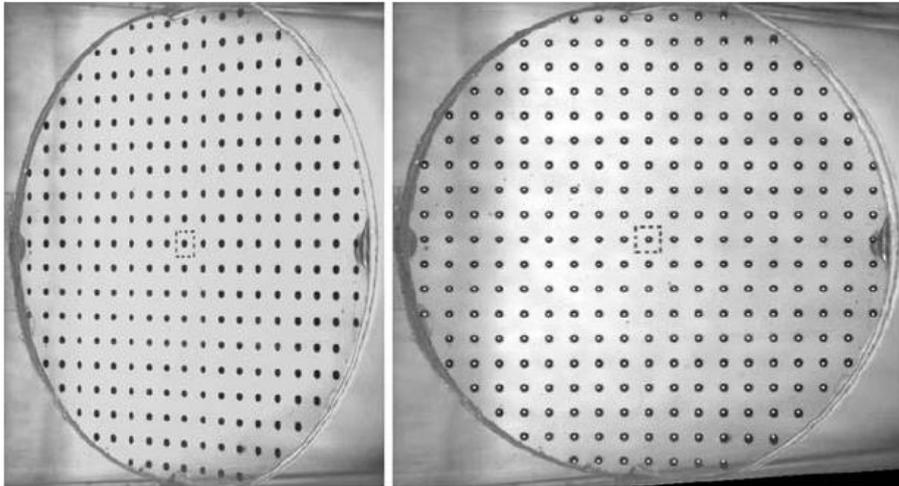


Figura 3-9 - Alvo antes e após a distorção da imagem por uma função de mapeamento (Van Doorne et al., 2007).

Com a calibração já realizada, é possível iniciar as medições. De acordo com Lin (2006), existem 3 métodos principais de processar as imagens de PIV, que diferem basicamente sobre em qual etapa será feita a correlação cruzada. São eles: método da distorção do vetor (Coudert et al., 2001), método de distorção da imagem (Coudert et al., 2001) e, finalmente, método de Soloff (Soloff et al., 1997).

Particularizando para o método de Soloff, são gerados dois pares de imagem para cada câmera e a técnica de PIV é executada, conforme descrito na seção 3.2, para cada par de imagem. Com a utilização da função de mapeamento, o campo vetorial é distorcido do plano da imagem para o plano da medição e, em seguida, interpolado em uma malha comum. Tal etapa é necessária pois, após a distorção, os vetores estão dispostos em malhas diferentes, o que impossibilitaria a combinação das imagens para gerar o deslocamento 3D (Prasad, 2000; Van Doorne et al., 2007; Soloff et al., 1997). A última etapa é chamada de reconstrução, na qual os deslocamentos Δx , Δy e Δz são obtidos. Seguindo a análise de Soloff et al.

(1997), o deslocamento de um ponto da imagem é dado pela equação (3.5), que pode ser aproximada para a equação (3.6):

$$\Delta S = F(s + \Delta s) - F(s) \quad (3.4)$$

$$\Delta S = \nabla F(s)\Delta s \quad (3.5)$$

Como na equação (3.7), "X" e "x" representam as coordenadas na imagem e no espaço, respectivamente, e o gradiente de F pode assumir diferentes formas (visto que existem 4 funções diferentes de F, dependendo da câmera ou da coordenada), esta pode ser reescrita como um produto de matrizes, conforme ilustrado na equação (3.7).

$$\begin{bmatrix} \Delta X^1 \\ \Delta Y^1 \\ \Delta X^2 \\ \Delta Y^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x^{(1)}}{\partial x} & \frac{\partial F_x^{(1)}}{\partial y} & \frac{\partial F_x^{(1)}}{\partial z} \\ \frac{\partial F_y^{(1)}}{\partial x} & \frac{\partial F_y^{(1)}}{\partial y} & \frac{\partial F_y^{(1)}}{\partial z} \\ \frac{\partial F_x^{(2)}}{\partial x} & \frac{\partial F_x^{(2)}}{\partial y} & \frac{\partial F_x^{(2)}}{\partial z} \\ \frac{\partial F_y^{(2)}}{\partial x} & \frac{\partial F_y^{(2)}}{\partial y} & \frac{\partial F_y^{(2)}}{\partial z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Com os deslocamentos determinados a técnica está completa, visto que o intervalo de tempo é conhecido. Apesar da equação (3.7) parecer superdimensionada, visto que existem 4 equações para 3 incógnitas, erros naturais no sistema fazem com que as equações não sejam linearmente dependentes. Existem, portanto técnicas para minimizar o erro, como por exemplo o método dos mínimos quadrados para minimizar a norma quadrática do resíduo (Soloff et al., 1997).

A Figura 3-10 mostra de forma resumida as etapas a serem executadas, a partir da metodologia de Soloff para SPIV.

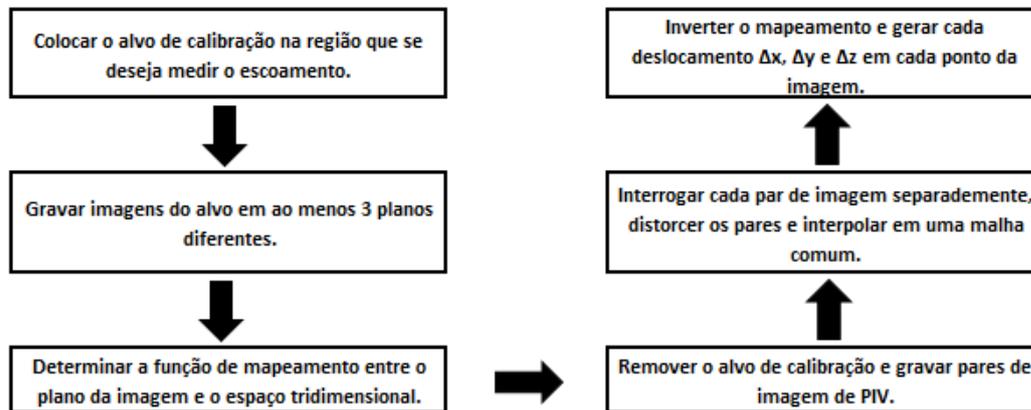


Figura 3-10 – Fluxograma do processo de SPIV seguindo a recomendação de (Soloff et al., 1997).

As outras técnicas citadas diferem da de Soloff nos seguintes aspectos: na técnica de distorção do vetor, uma malha é gerada no plano de medição e distorcida para o plano da imagem. Em seguida é efetuada a correlação cruzada e os vetores gerados são mapeados para o plano de medição para, enfim, serem comparadas as imagens das duas câmeras. A vantagem de tal metodologia é que não é necessário efetuar a interpolação dos vetores, pois a malha utilizada para as duas imagens foi a mesma. Já na técnica de distorção das imagens, a correlação cruzada é efetuada no plano de medição. Neste caso, as imagens é que são distorcidas para o plano de medição e, somente depois, a correlação cruzada é efetuada. As três técnicas são idênticas no sentido que buscam comparar vetores observados pelas duas câmeras no plano de medição para, enfim, inverter o mapeamento e gerar o campo tridimensional. Neste trabalho, o software Insight 4G foi utilizado para a calibração e processamento das imagens.

3.4. Outras técnicas de PIV

Apesar de todas as vantagens mencionadas nos tópicos acima, a técnica de SPIV não é capaz de quantificar todas as informações que podem ser úteis na área de mecânica dos fluidos. A técnica de SPIV mede as 3 componentes da velocidade em um plano e, por esse motivo, as

derivadas na direção para fora deste plano não são medidas. O vetor vorticidade e o tensor gradiente só tem todos os seus componentes determinados pelas técnicas 3D-3C (Raffel et al., 2007).

Uma das técnicas encontradas na literatura para medir os 3 componentes do vetor velocidade em uma região volumétrica do escoamento é a técnica de PIV tomográfico, na qual são utilizadas 4 câmeras. Uma alternativa a esta técnica é a de PIV holográfico, que utiliza o conceito de holografia para medir a velocidade. Por não serem o foco deste trabalho, tais técnicas não serão discutidas. O leitor mais interessado pode buscar mais informações em Raffel et al. (2007), Adrian et al. (2011), Abrantes et al. (2012) e Martins (2016).

3.5. Fluorescência induzida por laser

Em diversas aplicações de PIV, a visualização das partículas no escoamento pode ser prejudicada devido ao espalhamento de luz por outras superfícies que não as das partículas em si. Tais casos ocorrem com frequência em escoamento multifásico, pois a interface gás-líquido é uma fonte de reflexão, e em micro-PIV, seja porque as superfícies espalham muita luz ou porque a iluminação é direcionada para o sensor (Abrantes et al., 2012). De acordo com Santiago et al. (1998), para este último caso, o uso de partículas fluorescentes pode ser determinante na aquisição de dados.

Especificamente para o escoamento em golfada, além da luz espalhada pela interface na região do filme, na região do pistão líquido, pequenas bolhas dispersas podem ser confundidas com partículas e comprometer a técnica de PIV durante o processo de correlação cruzada.

O princípio de funcionamento das partículas fluorescentes está no que é chamado de Fluorescência Induzida por Laser (*Laser Induced Fluorescence*, LIF), baseado no fato de que algumas substâncias possuem a capacidade de emitir radiação na faixa do visível quando expostas à radiação eletromagnética. Neste fenômeno, os elétrons absorvem energia e ocorre a transição de um estado fundamental para um estado excitado,

denominado singleto. O retorno deste elétron para o estado fundamental gera liberação de energia, na forma de radiação visível. Este fenômeno é denominado fluorescência, e ocorre apenas enquanto energia é fornecida. Como as transições ocorrem muito rapidamente, sua aplicação em PIV é possível.

Durante o processo de absorção e emissão, há uma ligeira perda de energia, que é dissipada na forma de calor. A energia emitida é, portanto, ligeiramente menor que a absorvida, o que faz com que o comprimento de onda se torne ligeiramente maior. Tal fato pode ser explicado a partir da equação (3.8), onde E é a energia do fóton, h a constante de Planck, c a velocidade da luz no vácuo e, finalmente, λ é o comprimento de onda.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.7)$$

A Figura 3-11 mostra os espectros de absorção e emissão para uma substância fluorescente. A diferença entre os picos é normalmente chamada de deslocamento de Stokes.

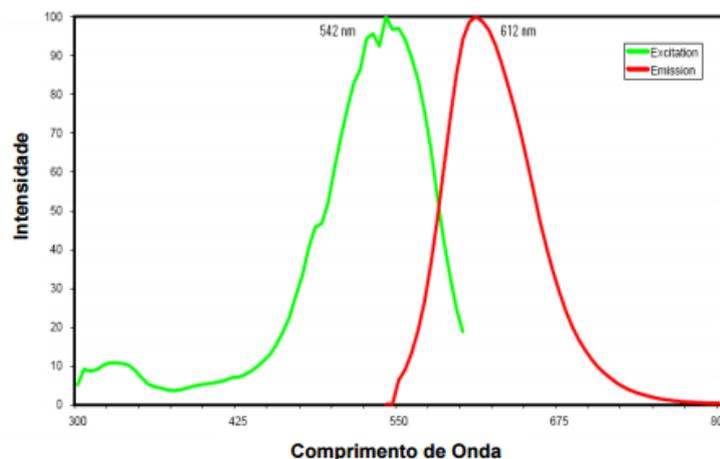


Figura 3-11 - Espectro de absorção e emissão para uma substância fluorescente. Fonte: Thermo Scientific.

Para a aplicação em PIV, é colocado um filtro em frente à câmera que deixa passar apenas radiação acima de um determinado comprimento de

onda. O problema de reflexão da luz do laser é contornado e apenas as partículas são visualizadas na imagem. A Figura 3-12 mostra o princípio desta técnica.



Figura 3-12 - Princípio de funcionamento da técnica de Fluorescência induzida por laser para aplicação em PIV.

3.6. Sistema de interruptores de feixe

O sistema de interruptores de feixe é um mecanismo para determinar o momento exato que a bolha passa em um ponto da seção. O seu princípio de funcionamento é relativamente simples, sendo baseado na diferença do índice de refração da água e do ar.

O sistema consiste em um emissor e um receptor de feixe de luz, que são colocados em lados opostos da tubulação, de maneira que o feixe de luz chegue no receptor quando existe apenas ar em seu caminho (além, obviamente, da parede da seção, que, neste caso, era de acrílico). Quando a tubulação está tomada por líquido, como água, o feixe é desviado e, conseqüentemente, não há leitura de sinal do receptor. A Figura 3-13 ilustra o princípio de funcionamento do sistema descrito.

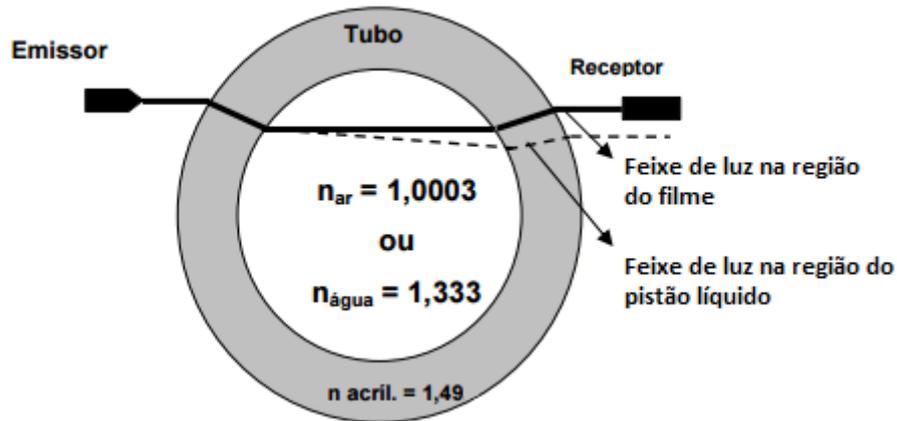


Figura 3-13 – Funcionamento do sistema de interruptores de feixe (Fonseca Junior, 2010).

O sistema de interruptores de feixe já foi utilizado com sucesso em diversos trabalhos como os de Fonseca Junior (2010), Carpintero-Rogero (2008) e Laurindo (2012). Neste trabalho, este sistema de interruptores de feixe foi adotado na obtenção de dados estatísticos do escoamento e como ferramenta de sincronização, garantindo a aquisição das imagens de PIV na região de interesse (a montante e a jusante do nariz da bolha).

4 Revisão bibliográfica

Neste capítulo será feita uma revisão bibliográfica dos principais artigos e trabalhos que buscaram obter, dentre outras grandezas, o campo de velocidades na fase líquido em um escoamento horizontal intermitente, objetivo deste trabalho. Diferentemente dos capítulos anteriores, a divisão aqui será por trabalho, apresentados em ordem cronológica.

4.1. Local studies in horizontal gas-liquid slug flow (Sharma et al., 1998)

Neste trabalho, o perfil de velocidade na direção axial, na fase líquida de um escoamento em golfada, foi medido com o uso de anemômetros de filme quente, com intervalo entre aquisições de 0,02s. O tubo utilizado possuía diâmetro interno de 50,3mm e os fluidos usados foram água e ar.

Foram efetuadas medições na região próxima ao nariz da bolha, na região próxima à traseira da bolha e na região de filme líquido. A velocidade da interface nas medições variou entre 2,7m/s e 3,25m/s. A fim de facilitar a análise deste artigo, aqui será assumido que a velocidade da interface representa a velocidade da célula unitária. Usando a média de velocidade para converter o tempo entre as aquisições em espaço, obtém-se que o espaço entre cada aquisição é de aproximadamente 1,18D.

É possível observar que o perfil de velocidade no pistão de líquido começa a ter uma aparência de um perfil desenvolvido a 0,06s (equivalente a 3,54D) do nariz da bolha, se tornando bastante semelhante, apesar de não completamente simétrico, a 0,10s (5,9D). Mais longe do nariz da bolha, o perfil parece sofrer interferência da bolha anterior, com o líquido presente na parte superior do tubo sofrendo aceleração, possivelmente pelo efeito de esteira que a bolha gera. Em relação à traseira da bolha, é possível observar que o perfil começa a mostrar semelhança com o perfil

desenvolvido a 0,12s (7,08D) após a passagem da bolha, sendo estes, bastante parecidos, a 0,2s (11,8D) da mesma.

Diferentemente da região do pistão de líquido, é possível observar, de acordo com os dados medidos, que o perfil de velocidade no filme líquido nunca se desenvolve. Devido à condição de não deslizamento na parede, e ao fato da tensão de cisalhamento causada pela velocidade do gás ser positiva, pois o gás se move mais rápido que o líquido presente nesta região, o perfil de velocidade no filme líquido apresenta um ponto de inflexão, entre a parede inferior do tubo e a interface.

Apesar do perfil de velocidade ter sido medido com sucesso neste trabalho, os autores afirmam apenas que um número maior que 3 células unitárias foram utilizadas para a determinação dos mesmos. Embora uma função polinomial tenha sido utilizada para interpolar os dados obtidos, como não foram efetuadas diversas medidas, de modo a convergir a média dos valores em cada ponto, é possível que os dados medidos não sejam representativos do perfil real de velocidade. Conforme discutido no capítulo 3, a técnica experimental utilizada neste trabalho não era uma técnica de campo e, portanto, não permitia a medição simultânea do vetor velocidade em diversos pontos.

4.2.

Slug velocity profiles in horizontal gas-liquid flow (Bertola, 2002)

Neste trabalho, por meio de sondas ópticas, o perfil de velocidade na direção axial da interface gás-líquido, na região do nariz da bolha alongada, foi obtido. Com o auxílio de parafusos micrométricos para mexer os sensores, diferentes pontos ao longo da direção radial puderam ser medidos.

De acordo com o autor, o regime intermitente pode ser classificado de acordo com o perfil de velocidade, que varia com o número de Froude. Assim, foram obtidas 3 tendências diferentes do perfil de velocidade, associadas ao escoamento pistonado (*plug flow*), ao escoamento de bolhas alongadas com bolhas dispersas e ao escoamento em golfada (*slug flow*). O número de Froude de transição entre cada padrão de escoamento foi

estabelecido como 1,8 e 5, respectivamente. Tais afirmações foram baseadas em 39 medidas efetuadas, com velocidades superficiais de líquido e gás diferentes, em um tubo com diâmetro interno de 80mm.

A técnica utilizada neste trabalho não permitia a medição do campo de velocidades simultaneamente em mais de um ponto, assim como impossibilitava a medida de velocidade na fase líquida.

4.3.

Simultaneous HS-PIV and shadowgraph measurements of gas-liquid flows in a horizontal pipe (Carpintero-Rogero et al., 2006)

Neste trabalho, a técnica de PIV longitudinal foi utilizada em conjunto com a técnica de luz pulsada de fundo e partículas fluorescentes para determinar, dentre outras informações, dois componentes dos vetores de velocidade na região logo a frente ou logo atrás da bolha de gás, em um escoamento intermitente. Os fluidos utilizados foram água e ar, e a seção de medição era formada por um tubo com aproximadamente 54mm de diâmetro interno e 11 metros de comprimento. A região de medição se localizava a 89D da entrada da seção.

Os resultados mostraram que é possível obter o campo de velocidades de um escoamento intermitente com a técnica de PIV, desde que a região de medição não seja muito aerada, o que poderia impossibilitar a visualização das partículas. A figura 4.1 mostra a velocidade média calculada, ao longo da passagem de uma célula unitária. É possível observar uma grande amplitude nos valores, o que pode ser justificado pelo fato da velocidade no filme líquido ser menor que no pistão.

Apesar da técnica de PIV ter sido empregada, não foram obtidos campos de velocidade baseados na média de diversas imagens. Na dissertação que deu origem a este trabalho, aqui referenciada como (Carpintero-Rogero, 2008), a autora utilizou 10 campos vetoriais para calcular a média em algumas poucas posições, perto do nariz da bolha alongada, não conseguindo, porém, convergir os valores, possivelmente pelo baixo número de imagens utilizadas.

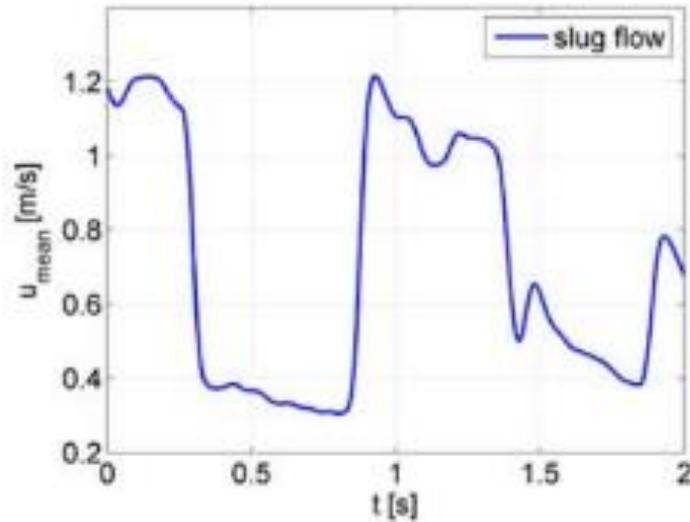


Figura 4-1 – Velocidade média ao longo do escoamento em golfada (Carpintero-Rogero et al., 2006)

4.4.

Medição do campo instantâneo de velocidade do líquido no escoamento bifásico intermitente em tubos horizontais e inclinados (Fonseca Junior, 2010)

Nesta dissertação de mestrado, o escoamento intermitente foi estudado com a técnica de PIV longitudinal acoplado à técnica de LIF e de luz pulsada de fundo. A região de medição estava localizada a 400D do início da seção de testes, formada por uma tubulação de acrílico de diâmetro interno de 24mm e comprimento de 10 metros.

Com um sistema de interruptores de feixe como o da seção 3.6, puderam ser obtidas imagens sempre da mesma região do escoamento, sendo estas, a região do nariz e da traseira da bolha alongada. Foi observada a formação de esteira na região da cauda da bolha, esta contendo alta recirculação, formação de vórtices e presença de bolhas dispersas, conforme esperado.

Tomando como referência o nariz da bolha, foram obtidos os perfis médios dos dois componentes da velocidade que puderam ser medidos (u e v), em 9 regiões, localizadas de $-0,8D$ a $0,8D$ do nariz da bolha, igualmente espaçadas de $0,2D$. Tais médias foram baseados em 150

campos vetoriais e cada vetor médio era considerado representativo caso, naquele ponto, existissem ao menos 50 vetores para o cálculo.

O perfil médio a $0,8D$ do nariz da bolha foi comparado com o perfil turbulento completamente desenvolvido baseado no modelo power-law, não sendo observada concordância. É possível que a uma distância maior, em regiões mais centrais do pistão de líquido, tal perfil fosse observado, não tendo sido feitas, porém, medições para confirmar esta hipótese.

Com o perfil médio de velocidade, foi calculado o valor quadrático médio da flutuação da velocidade das duas componentes medidas. Para calcular a flutuação da velocidade global, a terceira componente da velocidade (w) foi aproximada como igual a componente na direção transversal (v), o que permitiu a determinação da intensidade turbulenta do escoamento e da energia cinética turbulenta. Não foram encontrados na literatura trabalhos que possam confirmar ou desmentir tal hipótese.

Apesar de semelhante ao trabalho executado por Carpintero-Rogero et al. (2006), aqui foram obtidos os perfis médios convergidos das componentes u e v do vetor de velocidades em determinadas regiões, o que dá mais segurança às informações apresentadas. Além disso, a distância entre a região de medição e a entrada da seção neste trabalho era maior, o que gera um melhor desenvolvimento do escoamento.

4.5.

Three-dimensional unit slug in a horizontal pipe (Febres, et al., 2010)

Os dados experimentais obtidos por (Fonseca Junior, 2010) foram comparados, neste trabalho, com uma simulação numérica, efetuada no software comercial FLUENT™. As características do escoamento bifásico foram descritas com o modelo VOF, a turbulência com o modelo $k-\epsilon$ RNG e as equações foram resolvidas com o modelo matemático de volumes finitos.

Para manter a bolha fixa no mesmo ponto e simular uma única célula unitária, o referencial de movimento foi invertido. Assim, na metodologia numérica, a parede que se movia, com a velocidade de translação da bolha.

A comparação do resultado numérico com os dados experimentais, mostrou excelente concordância para a velocidade na direção axial, ambos para a região do pistão de líquido e para a região de filme líquido. Vale ressaltar apenas que, próximo à interface, a velocidade medida experimentalmente apresentou uma pequena redução de valor, o que não foi observado para o caso numérico. A concordância entre o perfil na direção vertical também pode ser considerada boa, ainda que abaixo da direção axial.

Comparando o erro médio obtido no perfil de velocidades, para a direção axial, este variou entre 5 e 15%, enquanto para a direção vertical, permaneceu na faixa de 20%. Como a técnica de PIV longitudinal gera apenas duas componentes de velocidade, a terceira componente, assim como outras grandezas que são dependentes desta, não puderam ser comparadas.

Os dados obtidos por Fonseca Junior (2010) também foram comparados com simulações numéricas em Carneiro et al. (2011), porém, com um enfoque diferente. Neste, o modelo numérico utilizado foi o modelo de dois fluidos unidimensional, que não gera um perfil de velocidades, inviabilizando, portanto, sua comparação com a técnica de PIV. Foram comparadas apenas grandezas estatísticas, também medidas por Fonseca Junior (2010).

4.6.

High-speed stereo and 2D PIV measurements of two-phase slug flow in a horizontal pipe (Czapp, et al., 2012)

Neste trabalho, a técnica de PIV estereoscópico foi aplicada pela primeira vez na fase líquida de um escoamento gás-líquido no padrão de golfada. Foram utilizadas partículas fluorescentes, água e ar como fluidos de trabalho e uma tubulação de 54mm de diâmetro interno. Dependendo da região de medição, se perto da traseira ou do nariz da bolha alongada, as câmeras tinham suas posições invertidas, de modo a evitar o bloqueio da região de medição pela bolha.

Inicialmente, foram efetuadas medidas com a técnica de SPIV e de PIV tradicional, com apenas água escoando na tubulação a diferentes

velocidades. O perfil médio de velocidade na direção axial obtido com as duas técnicas foi comparado, apresentando alta similaridade.

Com a técnica de SPIV validada em comparação com a técnica tradicional, esta foi aplicada para estudar o processo de formação da golfada. Foram obtidos os 3 componentes do vetor velocidade em um plano, para diferentes instantes de tempo. A Figura 4-2 ilustra a velocidade axial w e a velocidade vertical v para diferentes instantes de tempo durante o processo de formação do escoamento intermitente.

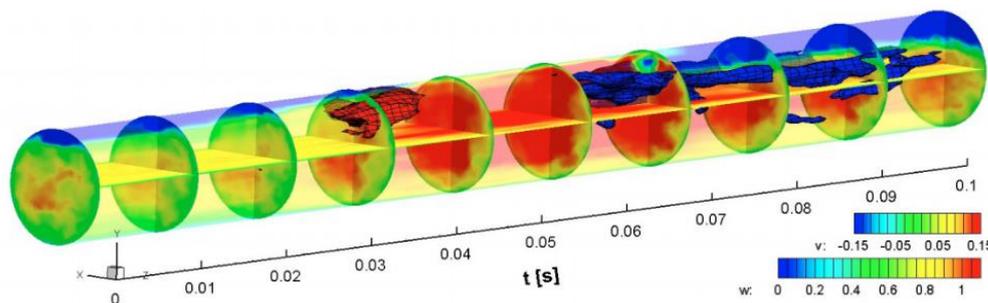


Figura 4-2 – Velocidade na direção axial (w). Iso-superfícies representam a velocidade na direção vertical (v) (Czapp et al., 2012).

A técnica de SPIV também foi utilizada para determinar o perfil da componente axial (w) dos vetores velocidade da fase líquida, em diferentes posições ao longo da célula unitária.

Apesar desse trabalho utilizar a técnica de PIV estereoscópico para determinar o campo de velocidade no escoamento em golfada, não foram mostradas médias dos campos vetoriais em regiões de interesse. Como o escoamento em golfada é conhecido como um fenômeno estocástico, seria interessante obter diversas medidas do escoamento em uma dada região (a uma determinada distância fixa do nariz ou da traseira da bolha alongada), o que geraria resultados mais representativos.

4.7.

Investigations on slug flow in a horizontal pipe using stereoscopic particle image velocimetry and CFD simulation with volume of fluid method (Czapp, et al., 2012)

Neste trabalho, foi efetuada uma simulação numérica, com o intuito de comparar os resultados com os dados obtidos com a técnica de SPIV em um escoamento em golfada por (Czapp, et al., 2012). A interface foi modelada com o modelo VOF e a turbulência foi descrita com o modelo $k-\epsilon$, aplicada ao método URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*). Foi feita inicialmente uma comparação para o caso que escoava apenas a fase líquida, onde foi avaliada a concordância da velocidade na direção axial entre a simulação numérica e os dados experimentais.

Para o escoamento em golfada, a comparação apresentou maior concordância na região central do pistão de líquido, conforme ilustrado na Figura 4-3. Na região de filme, apesar da fração volumétrica estar próxima para ambos os casos, a velocidade na direção axial está consideravelmente diferente (Região “a” e “e”). Vale ressaltar, também, que o autor utilizou escalas diferentes para a simulação numérica e experimental, o que, visualmente, pode levar a uma interpretação errônea de similaridade entre os casos.

A comparação dos dados no que diz respeito a formação da golfada, por outro lado, apresentou uma correlação consideravelmente menor, principalmente na fração de vazios (ou fração de líquido) para as diversas regiões medidas.

É possível que as diferenças registradas entre a simulação numérica e os dados experimentais sejam em virtude da natureza estocástica do escoamento, e que estas sejam reduzidas na medida que se obtenham dados médios em cada região da célula unitária. Estes devem ser baseados em diversas medições, e podem retratar o fenômeno de maneira mais representativa.

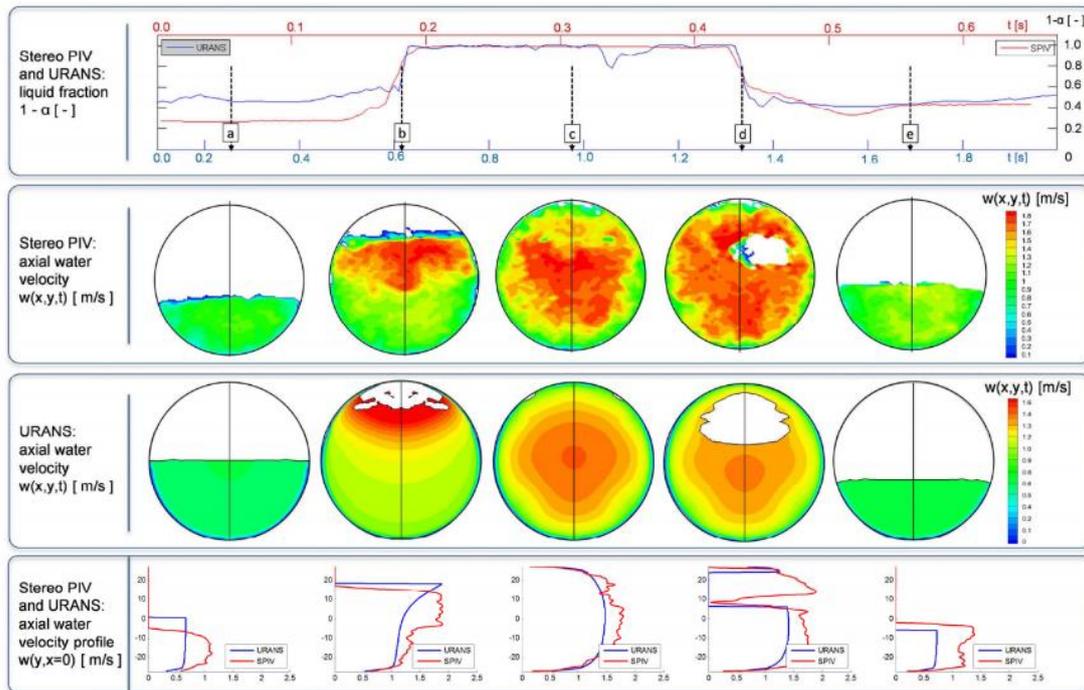


Figura 4-3 – Comparação da simulação numérica e dados experimentais da fração de vazios e velocidade na direção axial em diversos pontos de uma célula unitária de golfada (Czapp et al., 2012).

4.8.

Simultaneous velocity measurement and the coupling effect of the liquid and gas phases in slug flow using PIV-LIF technique (Siddiqui, et al., 2016)

Neste trabalho, a técnica de PIV longitudinal foi implementada em ambas as fases de um escoamento em golfada pela primeira vez. Foram utilizadas duas câmeras, uma para cada fase, e partículas fluorescentes para a fase líquida. O uso de filtros apropriados evitava a contaminação dos dados da câmera destinada a adquirir imagens da fase líquida pela fase gasosa e vice-versa (a câmera de observação da fase gasosa também captava sinais da fase líquida, de pouca intensidade, devido ao espalhamento de luz do laser pelas partículas fluorescentes).

Foram obtidos os vetores instantâneos de velocidade e o perfil de vorticidade na região próxima ao nariz e à traseira da bolha, além da região do filme líquido. O perfil de tensão de cisalhamento mostrou coerência,

apresentando magnitudes semelhantes na região da interface, apenas com sinal contrário. Não ficou claro, porém, se os dados foram baseados em uma única medida ou em médias de várias células unitárias. Em determinado momento foi calculado o perfil da velocidade média na direção longitudinal na região de filme líquido, sendo este perfil bastante diferente do perfil instantâneo. Não foi mencionado se o cálculo levou em consideração diversas imagens na mesma posição dentro do filme líquido ou a região inteira de filme para chegar em tais valores médios. A Figura 4-4 mostra o perfil de velocidades de ambas as fases, obtido na região de filme líquido. Não foi informada a distância do nariz da bolha alongada na qual os dados foram obtidos.

Outro fato que merece destaque é que a entrada da seção estava a apenas 3,5m da região de medição, o que associado ao fato do diâmetro da tubulação ser de 74mm, gerava uma relação L/D baixa, comparativamente com os outros trabalhos já publicados nesta área, podendo comprometer o desenvolvimento do escoamento em golfada.

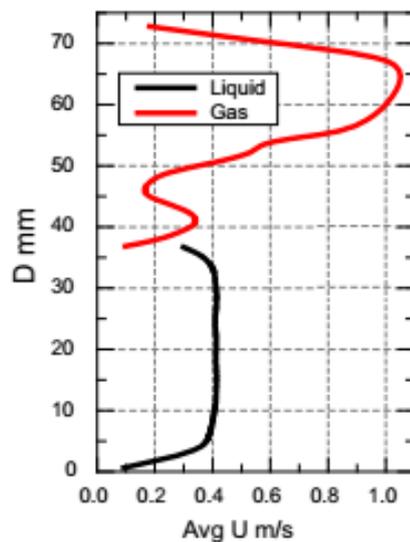


Figura 4-4 – Perfil de velocidade médio, na direção axial, na região de filme líquido em ambas as fases do escoamento em golfada.

4.9. Avaliação do estado da arte

A partir dos trabalhos apresentados neste capítulo, é possível observar que diversos autores já utilizaram variadas técnicas de medição para tentar obter os componentes dos vetores de velocidade em um escoamento intermitente. A literatura, porém, carece de trabalhos que consigam representar campos vetoriais médios a partir de diversas medições, efetuadas em posições conhecidas, dentro do pistão ou do filme líquido. Nos trabalhos encontrados durante a revisão bibliográfica, apenas Carpintero-Rogero (2008) e Fonseca Junior (2010) obtiveram perfis de velocidade baseados em médias, ainda que no trabalho de Carpintero-Rogero (2008), a própria autora tenha afirmado que poucos campos de velocidade foram utilizados na obtenção das médias, não obtendo a convergência necessária. Em ambos os trabalhos, apenas dois componentes da velocidade foram medidos, por limitação da técnica implementada.

A partir do discutido no parágrafo acima, fica claro que a literatura carece de dados de campos médios contendo as três componentes dos vetores de velocidade na fase líquida de um escoamento intermitente. O trabalho encontrado que chegou mais próximo ao mencionado foi o de Czapp et al. (2012), onde, apesar dos autores terem utilizado a técnica de PIV estereoscópico, não foram obtidos perfis de velocidade baseados na média de diversas aquisições. Este trabalho tem, como objetivo preencher, em parte, esta lacuna.

5

Seção de testes

Neste capítulo, será apresentada a seção de testes utilizada no presente trabalho. Inicialmente, será descrita a montagem geral, os sistemas de escoamento dos fluidos e a estação de medição, abrindo espaço, em seguida, para a discussão do sistema de PIV utilizado, com seus diversos componentes, do alvo de calibração, desenvolvido especificamente para esta aplicação e do sistema de interrupção de feixes.

5.1.

Descrição geral da seção de testes

A seção de testes deste trabalho foi formada principalmente por três conjuntos: o sistema de bombeamento de líquido, o sistema de escoamento de ar e a estação de medição. Por fazer parte de uma bancada experimental útil a diversos experimentos, o líquido utilizado foi uma mistura de água e glicerina de viscosidade e densidade de 60,9 cP e 1250 kg/m³, respectivamente. Os fluidos eram misturados na entrada da seção, por um tubo em Y e escoavam por uma tubulação de acrílico de diâmetro interno de 40mm, com 5mm de espessura de parede. A seção possuía um comprimento total de aproximadamente 17,7m ($L/D \approx 443$) e era apoiada sobre uma estrutura montada com perfis de alumínio Bosch de 45x45mm, que garantiam a rigidez e o alinhamento necessário ao experimento. Ao final da seção, o líquido retornava ao tanque e o ar voltava à atmosfera. As figuras Figura 5-1 e Figura 5-2 ilustram, respectivamente, um desenho em 3D e um esquemático da seção de testes, a fim de fornecer uma visão geral mais clara da mesma.

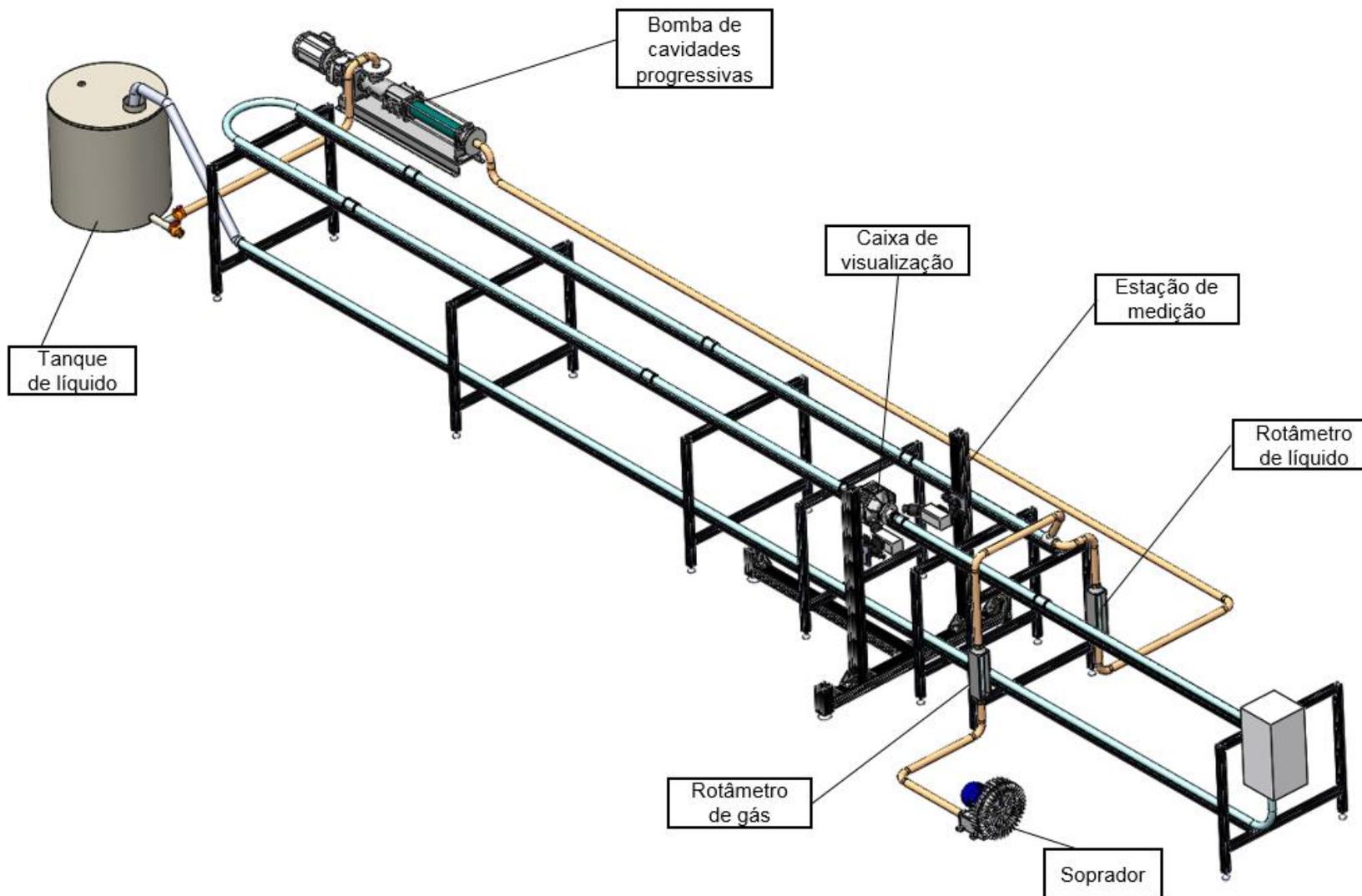


Figura 5-1 – Desenho tridimensional da seção de testes.

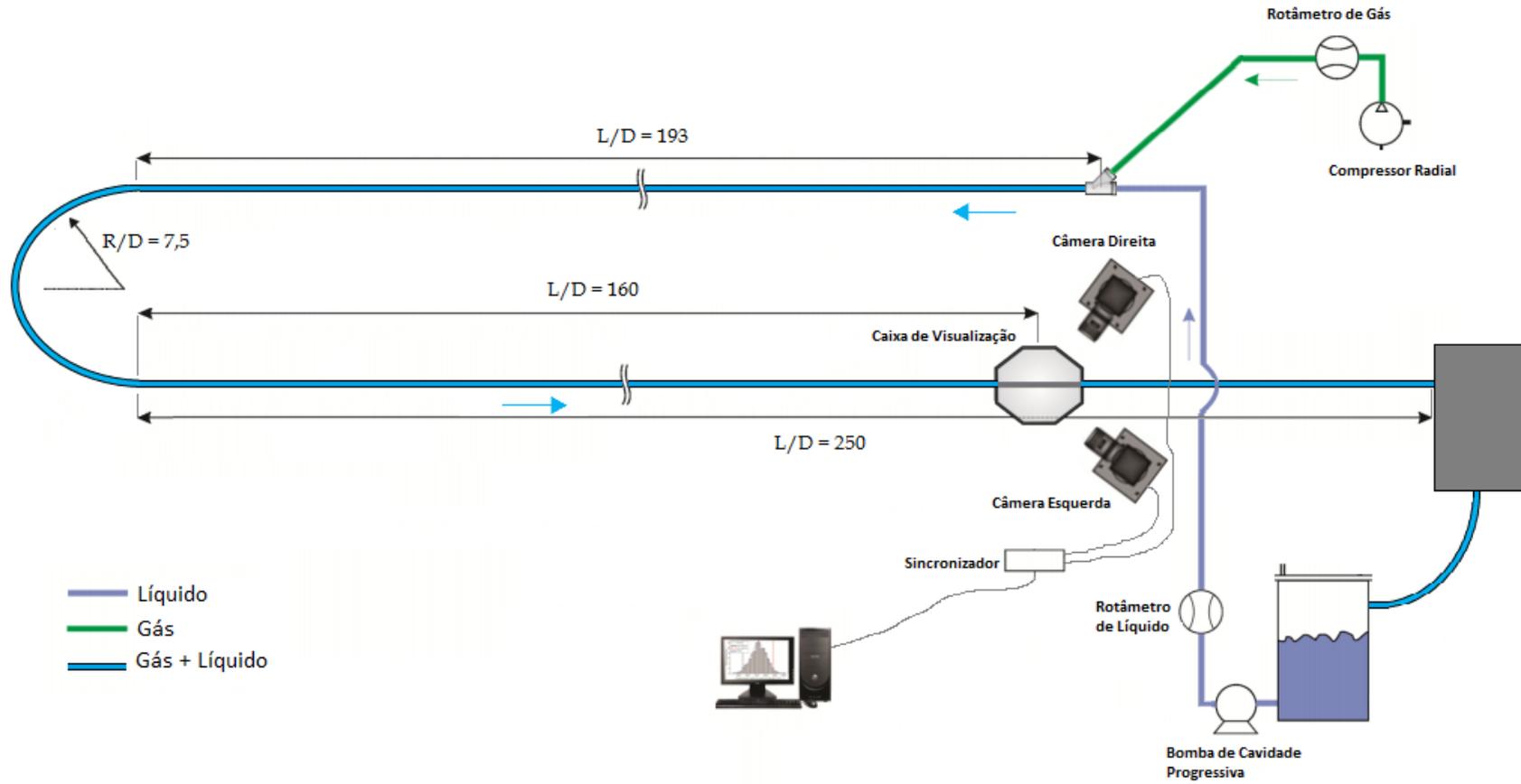


Figura 5-2 – Desenho esquemático da seção de testes.

5.2. Sistema de escoamento de líquido

O sistema de escoamento de líquido foi composto por uma bomba de cavidades progressivas (BCP), utilizada para impulsionar o fluido para a seção. A BCP era acionada por um inversor de frequência, que era capaz de alterar a rotação da bomba e assim garantir o controle da vazão do líquido. Também faziam parte do sistema um tanque de armazenamento de líquido e um trocador de calor.

5.2.1. Bomba de cavidades progressivas e inversor de frequência

A bomba utilizada no experimento era da marca Netzsch, modelo NM031, cuja curva fornecida pelo fabricante, de acordo com a norma de teste de bombas VDMA 24284, com incerteza de 2%, está ilustrada na Figura 5-3. O inversor de frequência utilizado era da marca WEG.

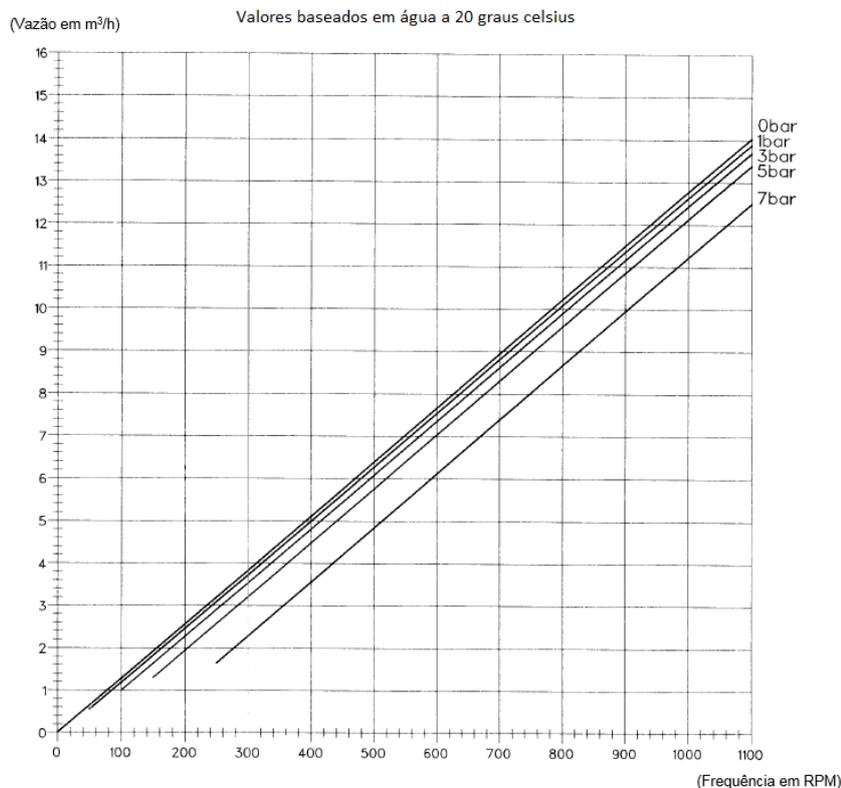


Figura 5-3 - Curva de operação da bomba de cavidades progressivas utilizada.

É possível observar que, nas bombas de cavidades progressivas, a vazão volumétrica não é muito influenciada pela pressão a jusante, e, conseqüentemente, sofrerá poucas variações com mudanças na queda de pressão na tubulação, tornando-se, portanto, recomendada para o estudo de escoamento intermitente.

5.2.2. Tanque de líquido

Após percorrer a seção de acrílico, a mistura multifásica era despejada em um tanque, onde ocorria a separação das fases, com o ar sendo liberado de volta à atmosfera. A Figura 5-4 mostra um desenho 3D do tanque utilizado. As válvulas na parte inferior permitiam que o mesmo fosse esvaziado sem ser desmontado da seção. Apesar da capacidade do tanque ser de aproximadamente 320L, durante os testes apenas cerca de 125L foram utilizados, a fim de economizar glicerina e partículas fluorescentes.

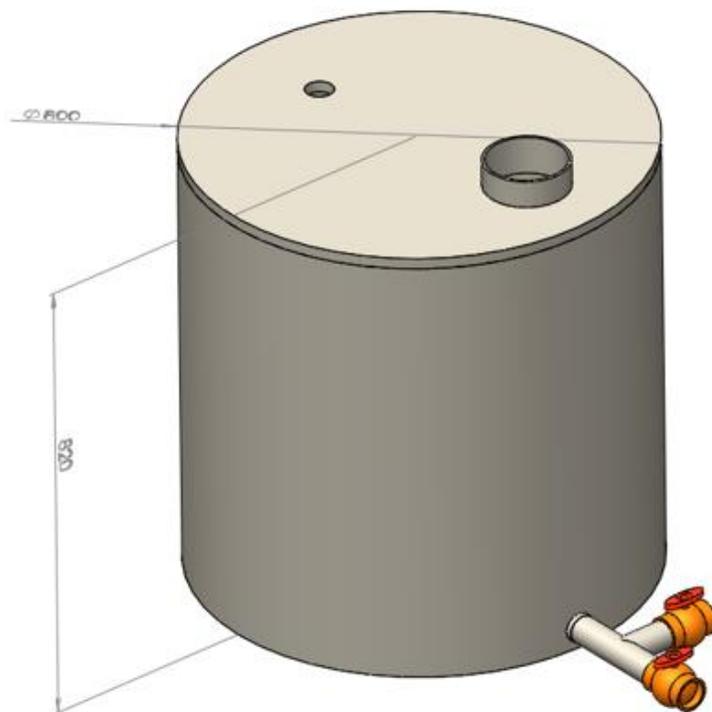


Figura 5-4 – Detalhe do tanque de separação com suas principais medidas.

5.3. Sistema de escoamento de ar

O sistema de escoamento de ar era formado por um compressor radial da marca WEG e modelo CRE-04, de 4cv. Este compressor podia fornecer uma vazão máxima de aproximadamente $2\text{m}^3/\text{min}$ para uma pressão manométrica na descarga de 3 metros de coluna da água, bem acima da utilizada, como será descrito na seção 6.1.3. Assim como na bomba de cavidades progressivas, um inversor de frequência da marca WEG era o responsável por variar a frequência de rotação do motor, garantindo que vazões diferentes da nominal pudessem ser utilizadas.

A vazão de ar que entrava na seção era medida por um rotâmetro de ar da marca SED.

5.4. Estação de medição

Entende-se por estação de medição o ponto da seção no qual os dados (no caso imagens) eram adquiridos. A fim de minimizar a distorção ótica causada pela passagem da luz por superfícies curvas de meios com índice de refração diferentes, foi utilizada uma caixa de visualização de acrílico. Preenchendo a caixa com o mesmo líquido utilizado no escoamento e posicionando a câmera ortogonalmente à parede da caixa, a visualização do escoamento teve uma melhora considerável. Caixas de visualização semelhantes foram utilizadas nos trabalhos de Fonseca Junior (2010) e Laurindo (2012), dentre outros.

5.4.1. Sistema de aquisição de imagens

Para permitir a utilização da técnica de PIV estereoscópico, as câmeras foram posicionadas em cima de bases coplanares, e inclinadas em 45 graus em relação à tubulação da seção de testes. A Figura 5-5 mostra diferentes vistas da estação de medição, enquanto a Figura 5-6 mostra o suporte de câmeras utilizado

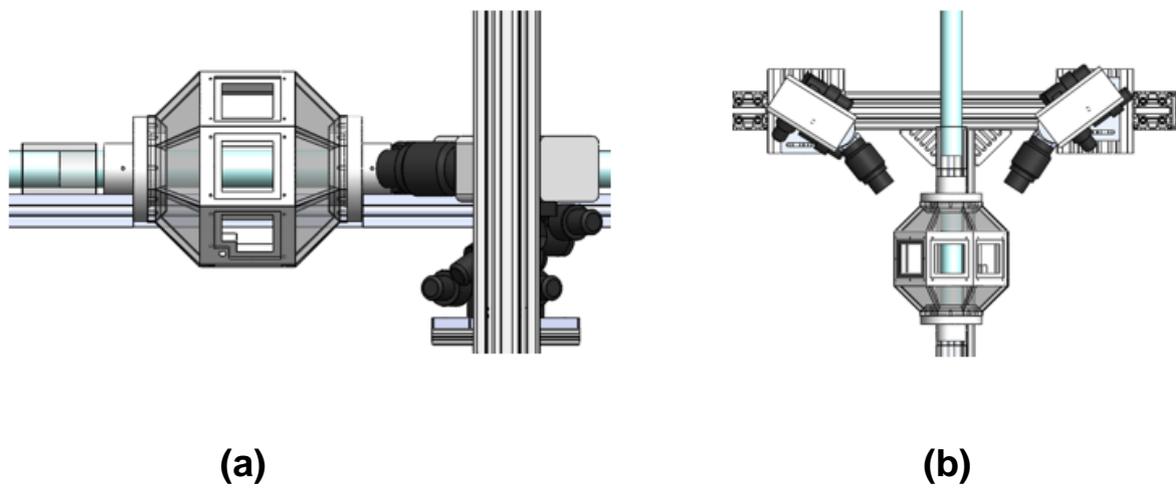


Figura 5-5 – Vistas (a) lateral e (b) superior da estação de medição.

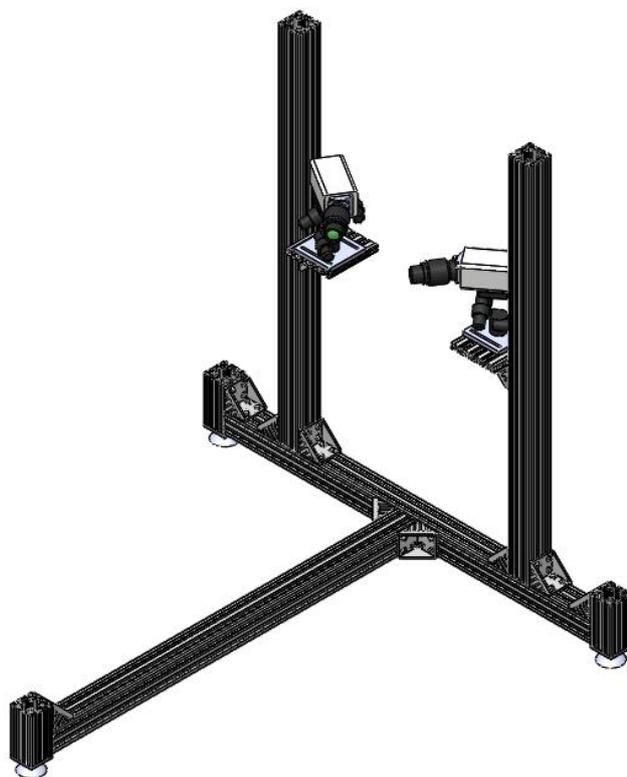


Figura 5-6 – Suporte utilizado para controlar o posicionamento das câmeras.

5.4.2. Caixa de visualização

Conforme mencionado anteriormente, uma caixa de visualização foi desenvolvida para minimizar os efeitos óticos de distorção. A caixa utilizada neste experimento possuía um total de 24 faces distintas pelas quais o escoamento poderia ser visualizado, o que facilita o estudo de fenômenos nos quais a visualização de determinados locais pode ser obstruída. A Figura 5-7 mostra um desenho esquemático da caixa de visualização utilizada. Apesar de aparentar pelo desenho ser constituída de materiais diferentes, a caixa era feita inteiramente de acrílico, somente com as janelas que encaixam na parte central, não representadas no desenho, de vidro.

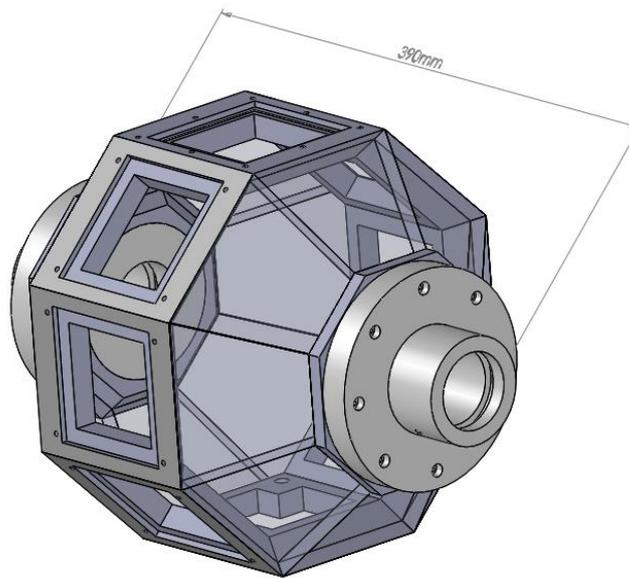


Figura 5-7 – Desenho da caixa de visualização de acrílico.

A caixa de visualização foi desenvolvida de tal forma que pode ser adaptada para seções com diferentes diâmetros trocando apenas o flange. Neste trabalho, o flange foi feito de PVC e cada um possuía dois furos roscados, diametralmente opostos. Tais furos foram utilizados para prender o flange no perfil Bosch, garantindo que a caixa permanecesse na mesma posição durante todo o procedimento experimental. Um anel de borracha

entre o flange e a caixa garantia a vedação por compressão, permitindo encher a caixa com o mesmo fluido utilizado no experimento. A Figura 5-8 mostra a caixa de visualização presa na seção, com destaque para o flange e a peça que garantia a fixação do sistema de visualização.

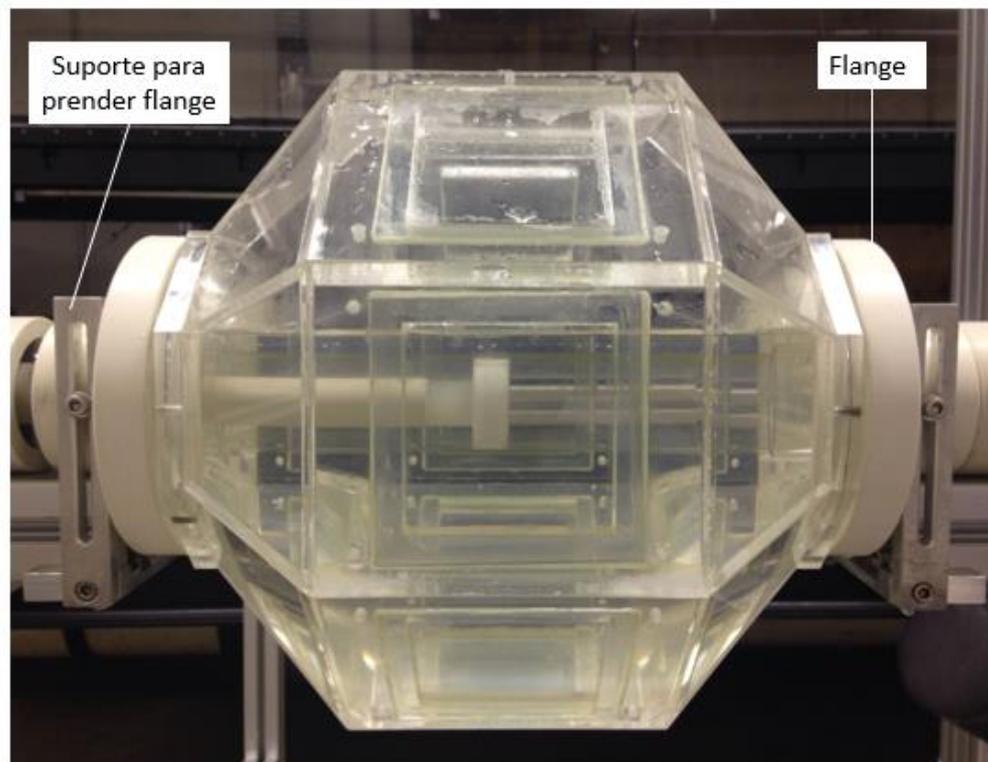


Figura 5-8 – Foto da caixa montada na seção, com o alvo de calibração em seu interior.

5.5. Sistema de PIV estereoscópico

Como já mencionado anteriormente, a técnica de PIV estereoscópico foi utilizada neste trabalho. Nesta seção, serão descritos os principais equipamentos utilizados para executar esta técnica, levando aos resultados expostos no capítulo 7.

5.5.1. Câmeras

As duas câmeras utilizadas neste experimento eram câmeras Phantom Miro M340, que possuíam pixels de $10 \times 10 \mu\text{m}$ de 12 bits e 12GB de memória RAM interna. No experimento realizado neste trabalho, a resolução das câmeras, em pixels, foi reduzida para 1200×1280 , a fim de permitir uma frequência de aquisição de 1000 Hz. O foco na região de medição foi garantido com o uso de adaptadores Scheimpflug, da LaVision, enquanto a ampliação correta foi obtida com lentes de 105mm Micro Nikkor da Nikon. A abertura focal utilizada foi $f\#11$, como será melhor explicado na seção 6.1.1.

5.5.2. Sistema de iluminação

O sistema de iluminação é formado pelo laser e pelo conjunto de lentes e espelhos que formam o plano de iluminação.

Neste trabalho, foi utilizado um laser Nd:YLF de dupla cavidade da New Wave, modelo Pegasus. Este laser, assim como a câmera utilizada, permitia aquisição em alta frequência, emitindo 10 mJ de energia por pulso, quando utilizado com frequência de pulsação de 1kHz. A luz era emitida na cor verde, com comprimento de onda de cerca de 527nm.

Para garantir a espessura desejada do plano de iluminação, em torno de 1,5mm, foi utilizada uma lente cilíndrica de distância focal $f = -25\text{mm}$, seguida de uma lente esférica de distância focal $f = 750\text{mm}$. Conforme reportado por Abrantes et al. (2012), esta configuração com uma lente cilíndrica seguida de uma esférica é a configuração mais usada de PIV. A Figura 5-9 mostra o sistema de iluminação em funcionamento. Além das lentes, foram utilizados dois espelhos, com o objetivo de refletir o feixe de luz em 90 graus, na direção desejada.

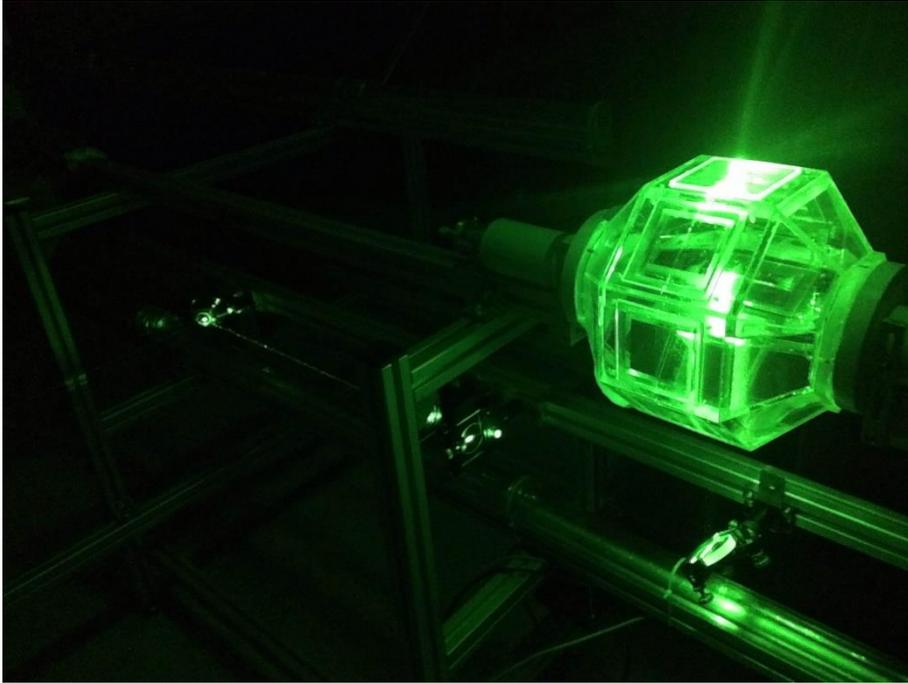


Figura 5-9 – Sistema de iluminação da técnica de SIV em funcionamento.

5.5.3. Sincronizador

Para sincronizar o tempo de disparo do laser com a abertura das câmeras, foi utilizado um sincronizador modelo 610036, da TSI. Neste trabalho especificamente, o sincronizador além de enviar sinais para as câmeras e para o laser, também recebia um sinal externo de um interruptor de feixes, conforme será detalhado na seção 5.6. O sincronizador era programado com o auxílio do software Insight 4G, também da TSI. Foi neste software, inclusive, que foi feito o processamento das imagens adquiridas.

5.5.4. Partículas

Conforme descrito na seção 3.2, para a utilização da técnica de PIV e suas derivações, são necessárias partículas traçadoras, que devem acompanhar o escoamento de maneira fidedigna. Em escoamento multifásico, particularmente, é comum o uso de partículas fluorescentes, cuja técnica foi explicada na seção 3.5.

Neste trabalho, em específico, foram utilizadas partículas fluorescentes da marca *Duke Scientific*, com comprimento de onda de excitação e emissão de 542 e 612nm, respectivamente. As partículas possuíam diâmetro médio de 24 μ m e massa específica de 1,05g/cm³.

5.5.5. Filtro ótico

Conforme explicado na seção 3.5, um filtro ótico deve ser utilizado para separar a luz emitida por fluorescência pelas partículas da luz do laser. Neste trabalho, foram utilizados filtros passa alta da Newport, modelo FSQ-OG550, com faixa de corte da ordem de 550nm. A partir dos comprimentos de onda de emissão do laser e das partículas, é fácil constatar que este modelo pôde ser utilizado neste experimento.

5.5.6. Alvo de calibração

Conforme descrito na seção 3.3.3, para a utilização da técnica de PIV estereoscópico é necessária a utilização de um alvo de calibração, que possibilitará a determinação dos parâmetros da função de mapeamento exposta na equação (3.4).

Neste trabalho, foi desenvolvido um aparato que permitiu a inserção do alvo na região de medição. Este era constituído de uma luva de vedação, que encaixava na parede externa da tubulação, um eixo para fixação do alvo, um micrômetro da marca Mitutoyo, com resolução de 10 μ m e um suporte conectando o eixo do alvo ao micrômetro. A Figura 5-10 mostra uma vista de tal aparato de calibração. Um rolamento preso no suporte deslizante era o responsável por transmitir o movimento do micrômetro ao alvo, possibilitando que diversos planos transladados de distâncias conhecidas fossem utilizados na calibração. Anéis de vedação de borracha eram os responsáveis pela vedação entre a luva e a tubulação e entre o eixo do alvo e a luva de vedação.

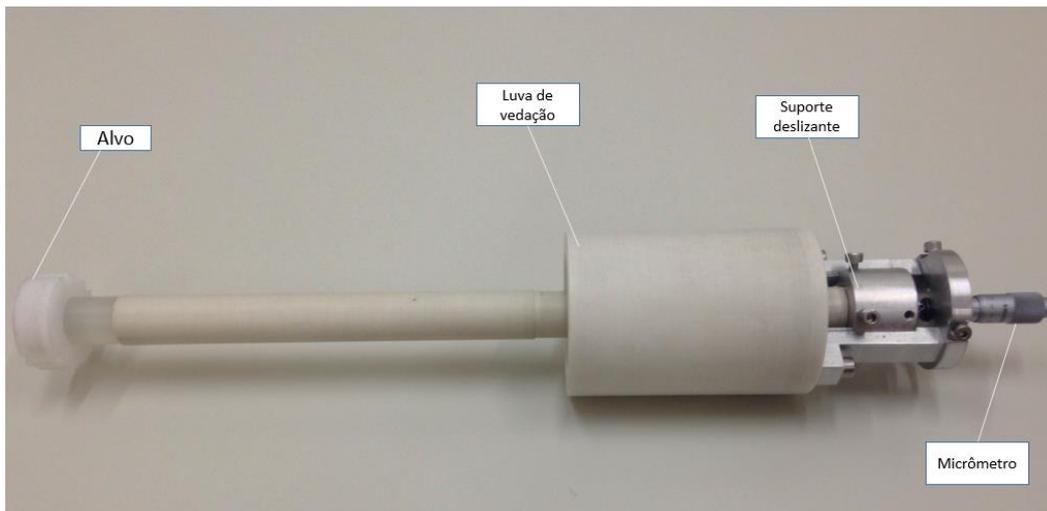


Figura 5-10 – Aparato desenvolvido para a calibração.

O alvo era formado por pontos com espaçamento conhecido e uma cruz no centro, indicando o ponto zero no plano cartesiano. Para evitar a presença de bolhas que distorcessem ou ocultassem certas regiões nas imagens das câmeras, prejudicando a calibração, rasgos foram feitos em pontos estratégicos do alvo, permitindo que bolhas pudessem ser retiradas da região de visualização. A Figura 5-11 mostra uma outra vista do alvo, onde as características discutidas neste parágrafo podem ser visualizadas.

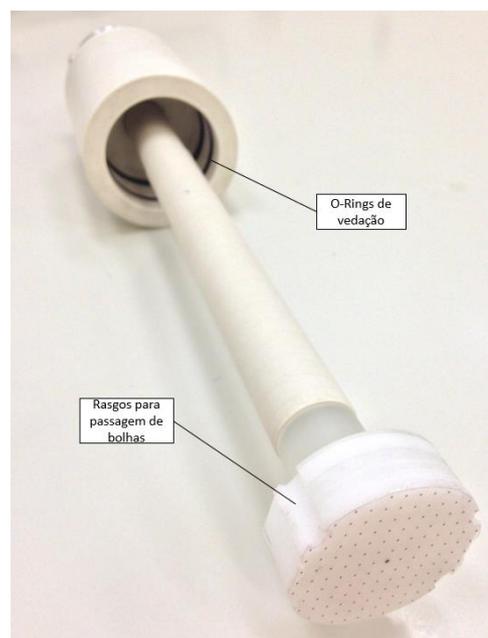


Figura 5-11 – Vista do alvo de calibração.

5.6. Sistema de interruptores de feixe

Para medir as estatísticas do escoamento intermitente estudado neste trabalho, e como forma de *trigger* para o sistema de PIV, três interruptores de feixe infravermelho da marca Pasco foram montados a aproximadamente 350 diâmetros da entrada, e com espaçamento entre si de cerca de 20mm. A Figura 5-12 mostra tal sistema, montado na seção de testes. Detalhes sobre como os interruptores de feixe foram aplicados neste trabalho serão detalhados na seção 6.4.1.



Figura 5-12 – Sistema de interruptores de feixe.

6 Procedimento experimental

Neste capítulo, serão descritos os procedimentos experimentais que possibilitaram a obtenção dos campos vetoriais expostos no capítulo 7. Inicialmente, será descrito como foram determinados os parâmetros experimentais de interesse da técnica de *SPIV*, como a massa de partículas adicionada, a abertura da lente da câmera, etc. O procedimento de calibração será descrito em seguida, seguido da descrição do teste de validação com escoamento monofásico, e, finalmente, do experimento bifásico em si.

6.1. Determinação dos parâmetros experimentais

Sempre que alguma técnica experimental é utilizada, é necessário determinar alguns parâmetros, que variam de acordo com o experimento, a fim de otimizar as medições efetuadas. Nesta seção, será descrito como foram determinados os principais parâmetros utilizados na técnica de *SPIV*.

6.1.1. Abertura da lente da câmera

A abertura da lente da câmera foi selecionada a partir do diâmetro das partículas nas imagens obtidas. De acordo com Westerweel (1997), a posição do pico de correlação, nos mapas de correlação cruzada, obtidos a partir do deslocamento das janelas de interrogação, possui uma incerteza menor para imagens cujas partículas apresentam cerca de 2 pixels de diâmetro. O diâmetro das partículas na imagem, em pixels, pode ser dado de acordo Adrian (1997), pela equação (6.1).

$$d_{im}^* = \frac{\sqrt{(Mdp)^2 + d_{diff}^2 + \Delta_{pixel}^2}}{\Delta_{pixel}} \quad (6.1)$$

Onde M representa a magnificação, dp o diâmetro real das partículas, d_{diff} o diâmetro devido à refração e Δ_{pixel} o tamanho de um pixel. Como é impossível que a partícula possua um tamanho, na imagem, menor que o tamanho do sensor, e diversos autores, inclusive, não consideram este termo, como em Abrantes et al. (2012), neste trabalho, foi efetuada uma modificação da relação proposta por Abrantes et al. (2012), colocando o termo Δ_{pixel} como valor condicional mínimo, transformando a equação (6.1) na equação (6.2).

$$d_{im}^* = \max \left(1, \frac{\sqrt{(Mdp)^2 + d_{diff}^2}}{\Delta_{pixel}} \right) \quad (6.2)$$

O termo d_{diff} representa a contribuição da difração na abertura da lente, sendo calculado de acordo com a equação (6.3) (Raffel et al., 2007), onde λ é o comprimento da onda difratada e f# a abertura da lente da câmera.

$$d_{diff} = 2,44f\#[M + 1] \lambda \quad (6.3)$$

A Tabela 2.1 mostra o diâmetro teórico das partículas na imagem para diferentes aberturas da lente, para a magnificação de 0,25 e diâmetro real médio das partículas de 24 μ m, valores utilizados neste trabalho. O valor de f# = 11 foi escolhido dada a sua proximidade com o valor ideal.

Tabela 6.1 – diâmetro das partículas na imagem para diferentes aberturas da câmera

d*(pixel)	f#
6,00	32
4,15	22
3,05	16
2,14	11
1,61	8
1,21	5,6
0,96	4
0,8	2,8

Uma vez que o valor de f# é determinado, a partir da análise do diâmetro das partículas, é necessário calcular a profundidade de campo, que é a espessura de um plano imaginário no qual todas as regiões das imagens adquiridas são obtidas em foco. A profundidade de campo pode ser calculada de acordo com a equação (6.4) (Raffel et al., 2007).

$$\delta_z = 2f\#d_{diff} \frac{(M + 1)}{M^2} \quad (6.4)$$

Neste trabalho, a profundidade de campo teórica para f# = 11 é de 9,03mm. Como o plano de laser possuía aproximadamente 1,5mm de espessura, é possível afirmar que todas as partículas iluminadas se encontravam focadas. O valor de f# foi, portanto, mantido como 11.

6.1.2. Cálculo da massa de partículas

Conforme descrito na seção 3.2, um dos fatores importantes a serem determinados na utilização da técnica de *SPIV* é a massa de partículas que deve ser adicionada à solução. Um conceito bastante utilizado para determinar a concentração de partículas nas imagens, é a densidade da imagem (*source density*, N_s), que é o número de partículas presentes em um cilindro imaginário de espessura do plano de laser (Adrian, et al., 1985), e que pode ser calculado de acordo com as equações (6.5) e (6.6) (Martins, 2016).

$$N_s = C \Delta_z \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_{im}^* \Delta_{pixel}}{M} \right)^2 \quad (6.5)$$

$$N_s = A_p ppp \quad (6.6)$$

Nas equações acima, C é a concentração de partículas, ppp é o número médio de partículas por pixel (*particles per pixel*), Δ_z é a espessura do plano de laser e A_p é a área média, em pixel, ocupada por uma partícula nas imagens, dada pela equação (6.7).

$$A_p = \frac{\pi}{4} (d_{im}^*)^2 \quad (6.7)$$

Combinando as equações (6.5), (6.6) e (6.7), é possível chegar na equação (6.8), para o cálculo da concentração de partículas.

$$C = \left(\frac{M}{\Delta_{pixel}} \right)^2 \frac{ppp}{\Delta_z} \quad (6.8)$$

A concentração de partículas pode ser obtida de maneira intuitiva pelo número de partículas colocadas na solução (n_p) pelo volume total da mesma, conforme a equação (6.9), onde V_{sol} é o volume total da solução.

$$C = \frac{n_p}{V_{sol}} \quad (6.9)$$

Assim como a concentração, o número de partículas pode ser calculado intuitivamente a partir da massa total de partículas sólidas (M_{part}) e da massa de uma partícula (m_{part}), conforme a equação (6.10).

$$n_p = \frac{M_{part}}{m_{part}} \quad (6.10)$$

A massa de uma única partícula é facilmente determinada com a densidade e o volume da partícula, ρ_{part} e V_{part} , respectivamente, como exposto nas equações (6.11) e (6.12).

$$m_{part} = \rho_{part} V_{part} \quad (6.11)$$

$$m_{part} = \frac{\rho_{part} \pi dp^3}{6} \quad (6.12)$$

Finalmente, a partir das equações (6.8), (6.9), (6.10) e (6.12), é possível chegar em uma única expressão para a massa de partículas que deve ser adicionada na solução, conforme expresso pela equação (6.13).

$$M_{part} = \left(\frac{M}{\Delta_{pixel}} \right)^2 \frac{ppp}{\Delta_z} V_{sol} \frac{\rho_{part} \pi dp^3}{6} \quad (6.13)$$

De acordo com Raffel et al. (2007), a concentração ideal de partículas para a técnica de PIV estereoscópico, em ppp, deve ser menor que 0,01, que, neste trabalho, significou uma massa menor que 3,96g. Apesar da equação (6.13) dar uma boa estimativa da massa de partículas

que deve ser adicionada à solução, é importante ressaltar que é comum, ao longo do tempo, partículas acumularem em alguns pontos na seção, diminuindo, portanto, a concentração na solução. Neste trabalho, pôde ser observado que a concentração ideal de partículas foi obtida com aproximadamente 4,8g, cerca de 20% a mais que o valor estimado.

6.1.3. Ponto de operação

No estudo de escoamento multifásico, é comum a vazão ser expressa indiretamente na forma da velocidade superficial, conforme descrito na seção 2.2.1. Neste trabalho, a velocidade superficial do gás e do líquido eram 0,2m/s e 0,4m/s, respectivamente.

Como o líquido utilizado neste trabalho não era água, mas uma mistura de água e glicerina, conforme descrito na seção 5.2, a maioria dos mapas de padrão de escoamento bifásicos não podem ser utilizados. Para solucionar este problema, foi gerado um mapa, baseado no trabalho de Taitel et al. (1976), utilizando como dados de entrada as propriedades dos fluidos empregados. A Figura 6-1 mostra a posição, no mapa descrito, do escoamento estudado. O número de Reynolds e de Froude da mistura foram 493 e 0,96, respectivamente.

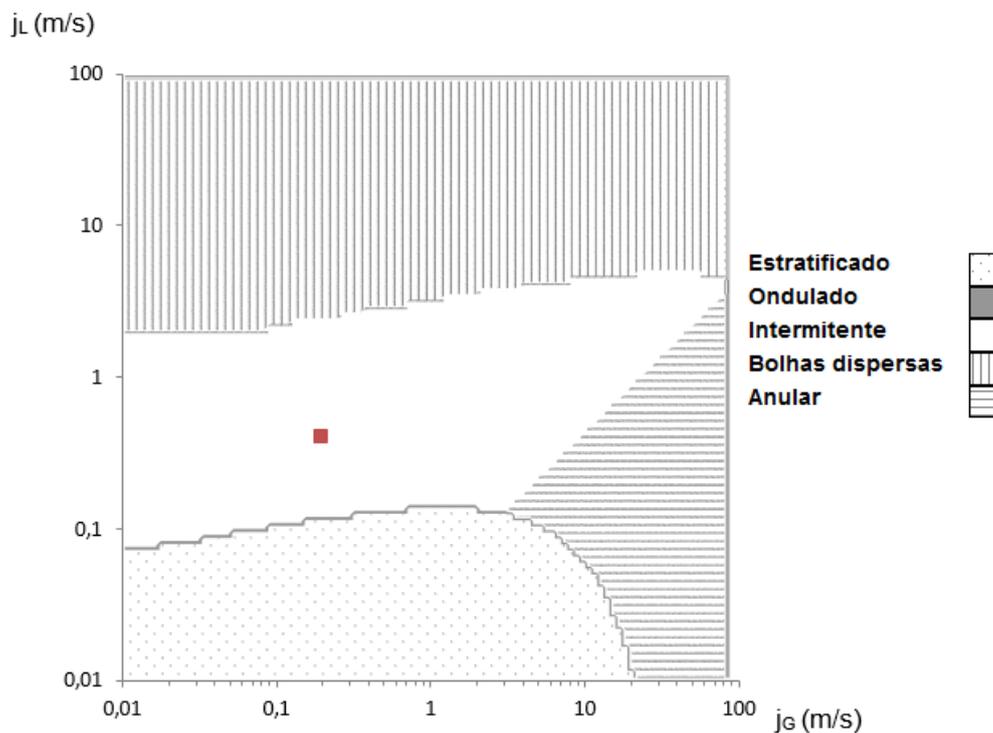


Figura 6-1 – Localização do caso estudado no mapa de configurações de escoamentos bifásicos.

6.2. Procedimento de calibração

Conforme descrito na seção 3.3, a técnica de PIV estereoscópico exige que seja feita uma calibração, a partir de imagens de um alvo, antes da aquisição e processamento das imagens das partículas. Neste trabalho, foram registradas imagens do alvo descrito na seção 5.5.6 em três planos, igualmente espaçados de 0,5mm entre si e estando o plano central de calibração na região central da espessura do plano de laser.

Para facilitar a detecção dos pontos no alvo de calibração, uma luz frontal foi fixada acima da seção, garantindo a iluminação do mesmo. Pedacos de cartolina preta foram presos nas janelas laterais e traseiras da caixa, com a intenção de garantir que outras fontes de luz, presentes no laboratório, não influenciassem nas imagens adquiridas. A Figura 6-2 e a

Figura 6-3 mostram imagens do arranjo experimental durante o procedimento de calibração.

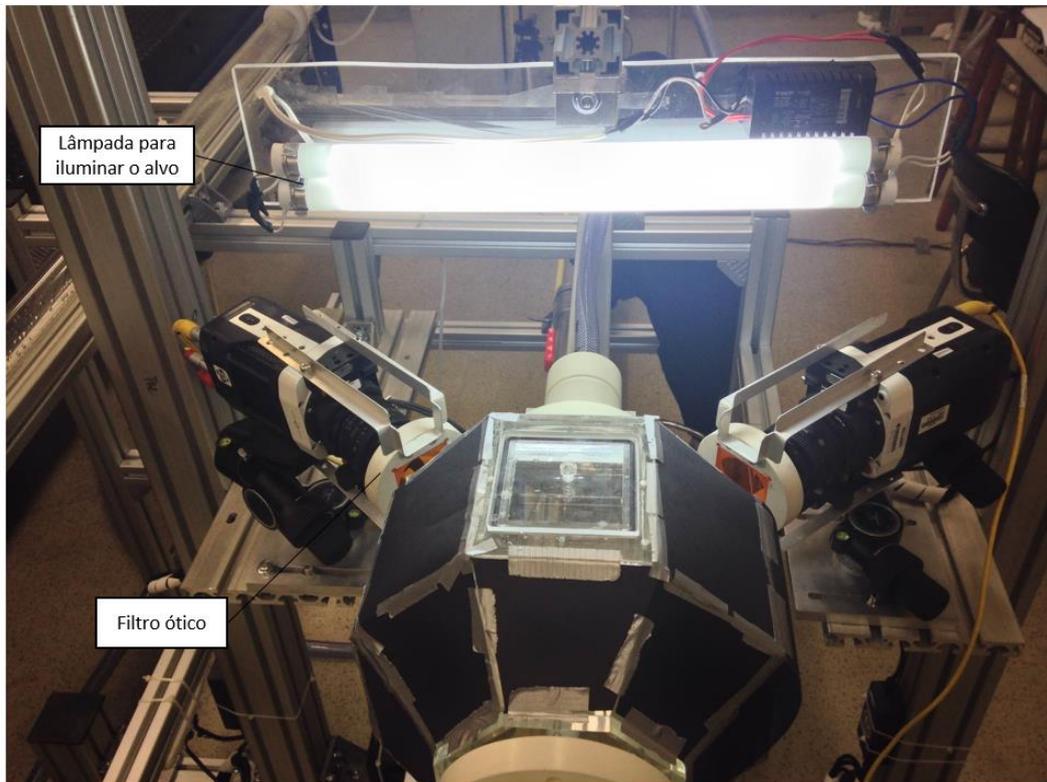


Figura 6-2 – Iluminação frontal ao alvo para o procedimento de calibração.

A inserção do alvo de calibração na região de medição foi executada a partir da remoção da seção de tubulação de acrílico a montante e a jusante da estação de medição. A utilização de luvas deslizantes permitiram que este processo fosse executado rapidamente.

Após a remoção da tubulação, o alvo de calibração foi inserido na caixa por um dos lados, enquanto uma luva, conectada a uma mangueira, foi inserida do outro, o que permitiu que a tubulação dentro da caixa de visualização fosse enchida com o líquido de trabalho (mistura de água e glicerina).

Após o início da calibração, a caixa de visualização não deve mais se movimentar, o que foi garantido com a fixação desta, pelos flanges, no perfil Bosch.



Figura 6-3 – Vista das câmeras e do alvo de calibração inserido dentro do tubo.

A Figura 6-4 mostra um par de imagem, dentre os três pares adquiridos durante o procedimento de calibração. É possível observar a presença de manchas, antes invisíveis ao olho nu, possivelmente causada pela cola utilizada para colar a matriz de pontos no eixo do alvo de calibração, e que dificultam o reconhecimento dos pontos do alvo pelo software utilizado.

Para melhorar a detecção dos pontos do alvo, as imagens foram binarizadas, com o auxílio do software ImageJ. A Figura 6-5 mostra o mesmo par de imagens da Figura 6-4 após o processo de binarização. É possível observar que este procedimento eliminou a influência das manchas na detecção dos pontos, tornando a calibração viável.

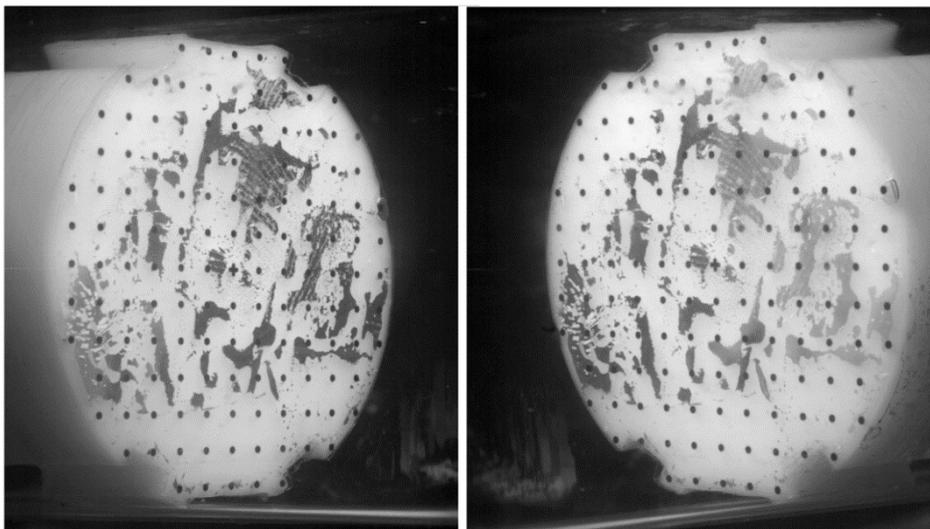


Figura 6-4 - Imagens do alvo de calibração na posição +0,5mm, adquiridas pelas câmeras da esquerda e da direita.

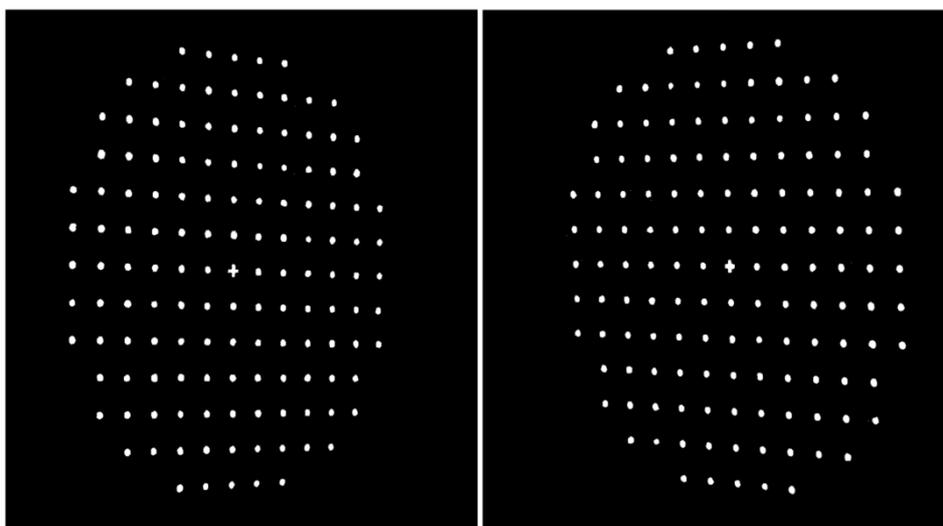


Figura 6-5 – Par de imagens binarizadas do alvo na posição +0,5mm.

Após o procedimento de calibração, com o intuito de verificar se a função de mapeamento obtida era capaz de distorcer as imagens do plano da imagem para o plano de medição, de maneira satisfatória, as imagens expostas na Figura 6-4 foram distorcidas, conforme exposto na Figura 6-6.

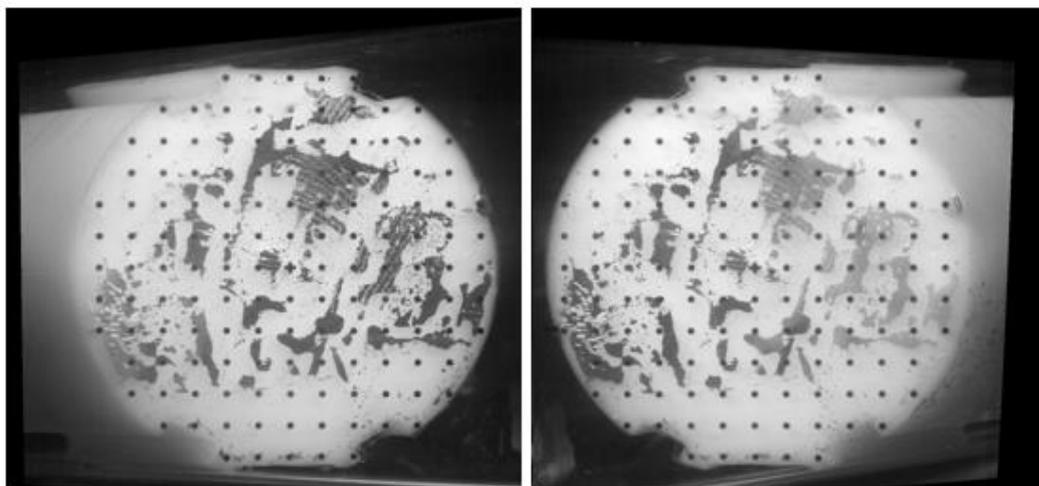


Figura 6-6 – Par de imagens distorcidas do alvo de calibração na posição +0,5mm, obtidas pelas câmeras da esquerda e da direita

A superposição do par de imagens da Figura 6-6 é ilustrado na Figura 6-7. É possível observar que os pontos do alvo de calibração coincidem em ambas as imagens, indicando que a função de mapeamento gerada consegue, satisfatoriamente, distorcer o par de imagens. Alguns poucos pontos, nas extremidades do alvo, tiveram uma superposição pior que no restante do mesmo, o que pode ser explicado por distorções óticas devido à espessura da parede interna do tubo de acrílico. Além disso, obteve-se o mesmo espaçamento entre os pontos ao longo da direção vertical e horizontal. De maneira geral, a calibração foi considerada satisfatória.

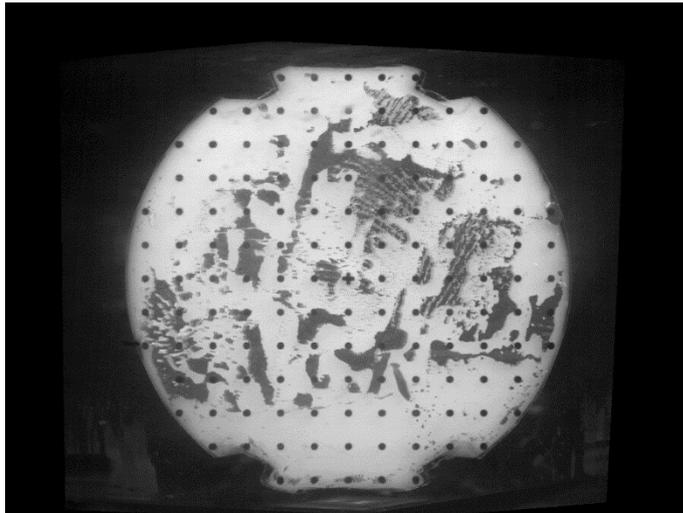


Figura 6-7 – Superposição do par de imagem do alvo de calibração na posição +0,5mm.

6.3. Validação com escoamento monofásico

Em todo trabalho experimental, a técnica de medição a ser utilizada deve ser validada, usando como base de comparação um outro equipamento ou uma grandeza conhecida. Neste trabalho, a validação da técnica de PIV estereoscópico foi efetuada com a medição do perfil de velocidade em um escoamento laminar monofásico hidrodinamicamente desenvolvido. Para isso, foram utilizados a mesma seção tubular e o mesmo arranjo óptico descritos no capítulo 5.

O escoamento laminar foi obtido a partir de uma vazão, fornecida pela bomba de cavidades progressivas, de aproximadamente 0,37 L/s, correspondendo a uma velocidade média de 0,29 m/s. Com as propriedades do fluido, descritas na seção 5.2, foi possível calcular o número de Reynolds como sendo aproximadamente 238. Os resultados obtidos para o escoamento laminar, e sua comparação com o caso teórico, serão expostos na seção 7.1.

Além de ser utilizado para validar a técnica de SPIV, empregada neste trabalho, o escoamento laminar monofásico também foi importante para corrigir a posição do centro de coordenadas, este determinado, até esse momento, apenas pelo alvo da calibração. Apesar de esforços para

posicionar o alvo perfeitamente no centro da tubulação, sempre existe um ligeiro desalinhamento deste, que poderia resultar em erros nas posições do perfil de velocidade, em relação ao centro do tubo. Como é conhecido da literatura que escoamentos laminares apresentam um perfil parabólico, com máximo de velocidade no centro do tubo, a velocidade medida do escoamento na direção axial, nos pontos mais próximos ao centro, foram interpolados nas direções X e Y. A partir das coordenadas do ponto de inflexão, ou de máxima velocidade do escoamento, a malha provisória pôde ser corrigida, de modo que as coordenadas de maior velocidade do escoamento fossem $X = Y = 0$. A malha corrigida foi utilizada para avaliar o caso intermitente. A Figura 6-8 mostra o perfil parabólico utilizado para corrigir a malha, na direção X e na direção Y, obtido a partir de 51 pontos. Em ambas as direções, a correção efetuada foi de menos de 1mm.

Para ambas as aplicações descritas acima, validação da técnica empregada e correção do centro da malha, o perfil de velocidade laminar foi obtido a partir da média de 350 campos vetoriais.

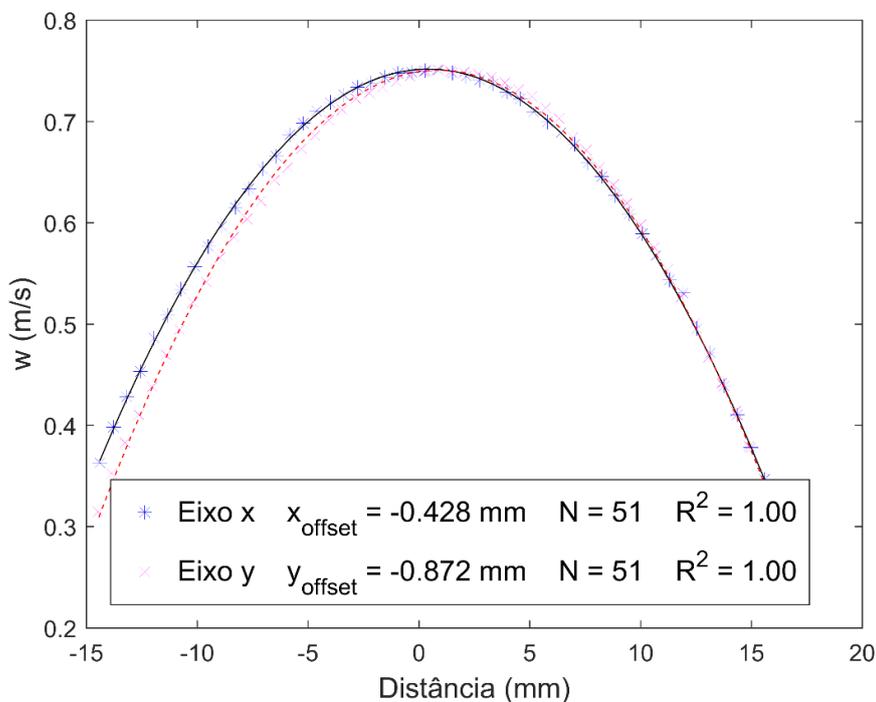


Figura 6-8 – Correção da malha a partir do perfil da componente axial da velocidade, em um escoamento laminar.

6.4. Escoamento intermitente

Nesta seção, serão apresentados os procedimentos utilizados para obtenção de dados referentes ao escoamento bifásico intermitente, de interesse neste trabalho. Inicialmente, será descrito o procedimento utilizado para obter dados estatísticos do comprimento do pistão de líquido e da velocidade de translação da bolha alongada, seguido do procedimento de obtenção das imagens de PIV estereoscópico e da metodologia utilizada no processamento destas imagens e obtenção de máscaras na região da bolha alongada (fase gás).

6.4.1. Dados estatísticos

Neste trabalho, foram medidos dados estatísticos do comprimento do pistão de líquido e da velocidade de translação do nariz da bolha alongada. Tais medidas foram efetuadas com a finalidade de caracterizar o escoamento, mostrando se o mesmo se encontrava desenvolvido ou não.

Para obter os dados estatísticos mencionados, foi utilizado o sistema de interruptores de feixe descrito na seção 3.6 e 5.6. Um circuito eletrônico do tipo XOR (*exclusive or*) foi aplicado na saída dos sinais dos dois primeiros sensores, de modo que um pulso característico pudesse ser gerado sempre que a frente da bolha alongada se encontrasse entre esses sensores. A partir da duração deste pulso, e da distância entre os sensores, a velocidade de translação da frente da bolha alongada pôde ser calculada.

Os dois primeiros sensores eram utilizados para calcular a velocidade de translação da frente da bolha alongada, que será utilizado para converter o tempo entre as imagens em espaço. O terceiro sensor pôde, portanto, ser utilizado para calcular o comprimento do pistão de líquido. Quando o feixe infravermelho é interrompido, o sensor mantém sua tensão de saída no valor lógico. A partir do intervalo de tempo em que o terceiro sensor mantém seu valor lógico, e de posse da velocidade de translação da célula unitária, é possível calcular o tamanho do pistão de

líquido. A metodologia descrita foi implementada através de uma rotina no software LabView.

A técnica descrita acima apresentou, provavelmente como principal dificuldade, o fato de que pequenas bolhas dispersas no pistão de líquido podiam permitir a passagem do feixe infravermelho, ocasionando medidas inconsistentes, conforme exposto na Figura 6-9. A maneira encontrada para solucionar tal problema, foi utilizar um filtro eletrônico e um filtro digital, de modo a minimizar o ruído gerado. Após a aquisição, foi considerado, como critério de seleção de dados válidos, que pistões com comprimento menor que 5 diâmetros seriam descartados, por não serem representativos do fenômeno observado. Os dados de velocidade de translação das células unitárias, para esses pistões, também foram descartados. Ao final do pós-processamento, um total de 1154 dados foram considerados válidos.

Mais detalhes sobre a utilização de sistemas de interruptores de feixe para calcular dados estatísticos no escoamento intermitente podem ser encontrados nos trabalhos de Fonseca Junior (2010) e Laurindo (2012).

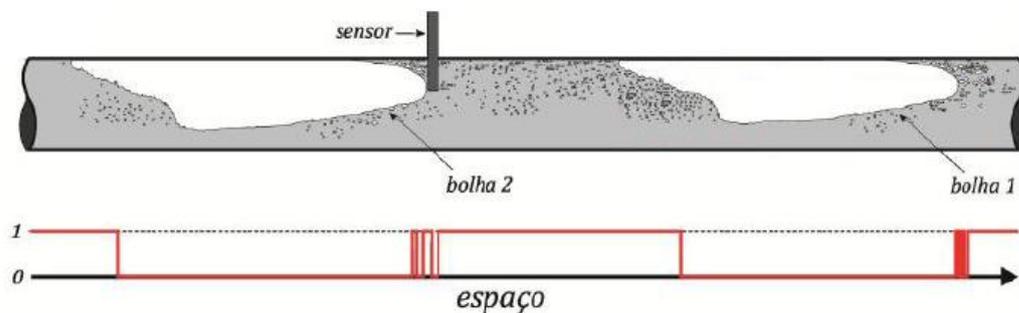


Figura 6-9 – Ruídos no sinal lógico devido a presença de bolhas dispersas no pistão de líquido. Adaptado de Laurindo (2012).

6.4.2. Aquisição das imagens

Com a resolução e frequência de aquisição das imagens descritas na seção 5.5.1, foi possível obter, a cada rodada, aproximadamente 1000 pares de imagens em sequência, o que correspondia a memória total de cada câmera. O *trigger* para o início de aquisição das imagens era dado a

partir de um interruptor de feixes, mantido a uma distância conhecida da região de medição. Quando a bolha chegava no interruptor de feixe, o sinal deste era reestabelecido, e um sinal para início de aquisição era enviado. Com essa metodologia, foi possível obter imagens da região de pistão e de filme líquido. Foram efetuadas um total de 150 aquisições, cada uma com aproximadamente 1000 pares de imagens, para cada câmera, da passagem da bolha pela região de medição. Todas as aquisições foram obtidas com as mesmas condições experimentais, a fim de gerar imagens representativas do mesmo fenômeno.

6.4.3. Processamento das imagens

A frequência de aquisição de imagens utilizada foi de 1000 Hz, o que faz com que o espaço de tempo entre cada par de imagem seja, conseqüentemente, de 1ms. Para evitar problemas de desalinhamento, os dados devem ser adquiridos com o menor intervalo de tempo possível, o que inviabilizou uma análise em tempo real dos dados adquiridos, que poderia determinar o número de campos vetoriais necessários para convergir a média de maneira satisfatória. Foram efetuadas, portanto, 150 aquisições, cada uma com aproximadamente 1000 pares de imagens para cada uma das duas câmeras. Como o processamento de todas as imagens demandaria um tempo computacional extremamente elevado, foram selecionadas

regiões de interesse, utilizando a bolha alongada como referência. Foram processadas as imagens obtidas entre 200ms a jusante e 200ms a montante da frente da bolha alongada, para todas as 150 aquisições. Entre 0 e 100ms, a montante e a jusante, as imagens foram processadas com intervalo de 2ms, a fim de obter uma elevada resolução temporal nesta região. Entre 100 e 200ms, o intervalo foi de 10ms.

O processamento das imagens de SPIV, efetuado por meio do software Insight 4G, empregava um algoritmo multipasse com ajuste gaussiano do pico da correlação. Foram utilizadas janelas de interrogação iniciais quadradas de 64pixels, seguidas de janelas de 32 pixels, com 50%

de sobreposição. Tal procedimento gerou uma malha com resolução satisfatória, contendo vetores espaçados de 0,61mm. Em cada uma das regiões de interesse, descritas no parágrafo acima, foram obtidas imagens do mínimo de intensidade, em cada pixel, das 150 imagens representativas de cada região. As imagens utilizadas no processamento foram subtraídas desta imagem mínima, a fim de eliminar problemas de reflexão e acúmulo de partículas na parede da tubulação. Um filtro passa alta com limiar de corte baixo foi acrescentado para eliminar ruídos do sensor CMOS. Tal prática é comum em experimentos de PIV.

Apesar da frequência de aquisição ter sido a mesma para o laser e a câmera, não é raro que, em alguns experimentos, um pequeno número de imagens percam o sincronismo com o laser. Nesses casos, ambos os feixes do laser poderiam ser registrados no mesmo quadro (*frame*) da câmera, ou um dos quadros poderia não receber iluminação. Como será ilustrado no capítulo 7, as grandezas calculadas foram sempre baseadas na média dos 150 campos vetoriais. Para cada região processada, foi gerado um gráfico da intensidade média de iluminação de cada imagem, pelo índice da imagem, conforme ilustrado na figura 6.10. A partir da análise da intensidade destas imagens, pôde ser observado que as imagens utilizadas não perderam sincronismo, pois não ocorreram imagens com zero de intensidade ou com picos muito fora de escala, apenas pequenas oscilações intrínsecas à variação de intensidade dos pulsos de laser.

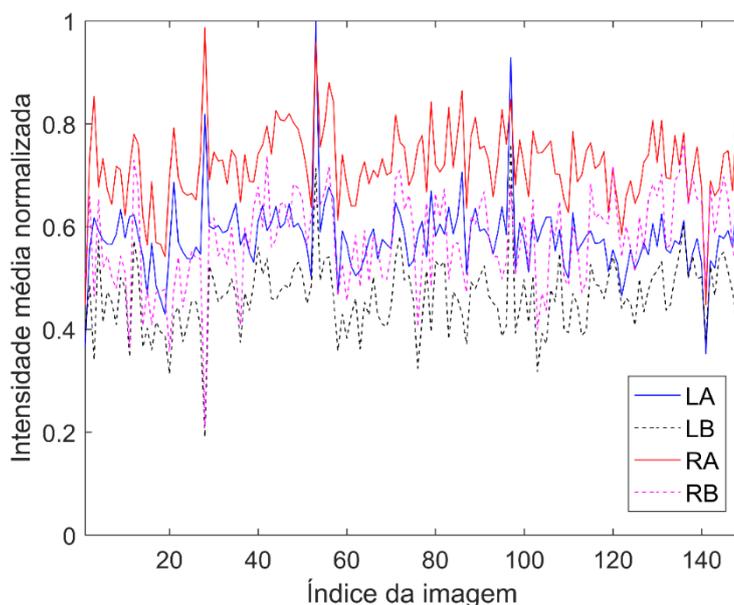


Figura 6-10 – Exemplo de gráfico utilizado para avaliar se não houve problema de sincronização entre as imagens. LA, LB, RA e RB indicam os quadros A e B das câmeras da esquerda e da direita, respectivamente.

6.4.4. Máscara das imagens na região do filme líquido

Na região do filme líquido existe uma área considerável ocupada pela bolha alongada, e que varia ao longo da região de filme líquido. Como nesta região a correlação cruzada retorna vetores não representativos, pois não existem partículas traçadoras no gás, foi necessário desenvolver uma metodologia que buscasse capturar a interface gás-líquido, de modo que uma máscara pudesse separar os vetores espúrios, obtidos na fase gás, dos vetores válidos, da fase líquido. Além disso, como na técnica de SPIV são utilizadas duas câmeras, em lados opostos da tubulação, a presença da bolha alongada gerava uma região de obstrução, diametralmente oposta à câmera, onde não era possível observar partículas e, conseqüentemente, não é possível a obtenção de vetores válidos.

A metodologia utilizada para detectar a região de medição válida, foi baseada na obtenção de imagens da intensidade máxima, em cada pixel, para cada câmera. Tais imagens foram geradas em todos os pontos de interesse dentro da região de filme líquido, e foram obtidas a partir das 150 imagens representativas deste ponto. A Figura 6-11 mostra as imagens do máximo de intensidade, em cada câmera, para o ponto 10ms a montante da bolha alongada. É possível observar a região ocupada pela bolha e a obstrução de visão gerada por esta.

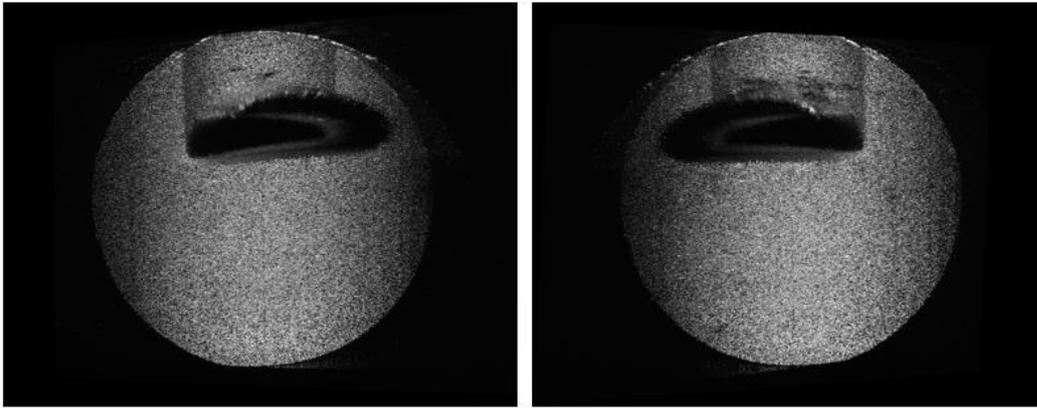


Figura 6-11 – Imagem do máximo de intensidade em cada pixel, para a região 10ms a montante da bolha, para as câmeras da esquerda e da direita, respectivamente. É possível observar a obstrução causada pela bolha alongada.

Para obter a região de máscara, uma nova imagem foi gerada, a partir do mínimo de intensidade das imagens do máximo de intensidade das duas câmeras. Assim, as regiões que contêm partículas, em ambas as câmeras, foram realçadas, em detrimento das regiões onde só se pode observar partículas em uma das câmeras, conforme ilustrado na Figura 6-13. Como a falta de partícula em uma das imagens, em determinada região, impossibilita a obtenção de vetores bons, a região de obstrução de ambas as imagens foi, neste trabalho, considerada como região de máscara para o campo vetorial gerado. A máscara gerada ocupava, conseqüentemente, uma área maior que a da bolha alongada.

Além da máscara obtida, as imagens de máximo de intensidade também podem ser combinadas para realçar a região onde a bolha alongada se encontra. Para isso, uma nova imagem é gerada, esta a partir da intensidade máxima de ambas as imagens de máximo de intensidade, mostradas na Figura 6-11. O resultado é apresentado na Figura 6-12. Observa-se, por esta figura, uma atenuação da iluminação na parte de líquido acima da bolha, pelo fato do caminho óptico do plano de laser passar pela bolha antes de iluminar esta região. A evolução da altura do filme de líquido e do formato da bolha será um dos trabalhos futuros, que já vem sendo desenvolvido.

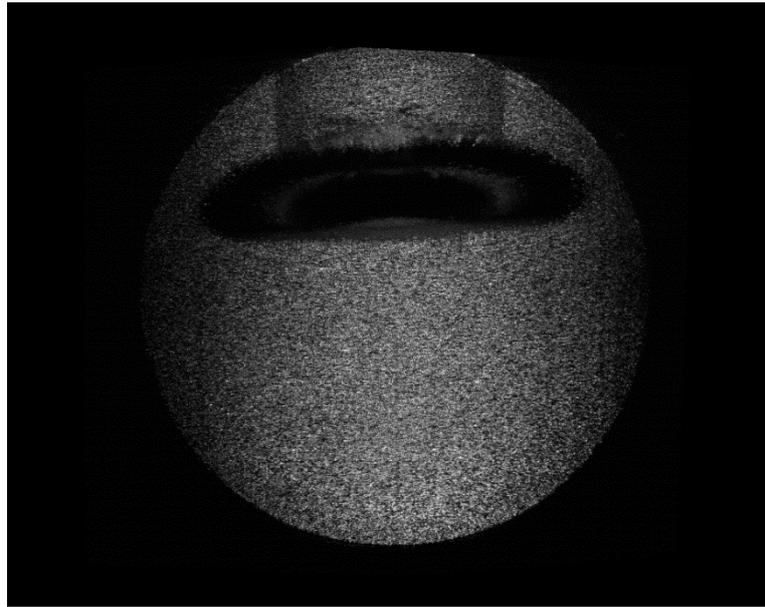


Figura 6-12 – Imagem obtida a partir da intensidade máxima em cada pixel, das imagens obtidas a partir do máximo de intensidade, para o ponto 10ms a montante da bolha.

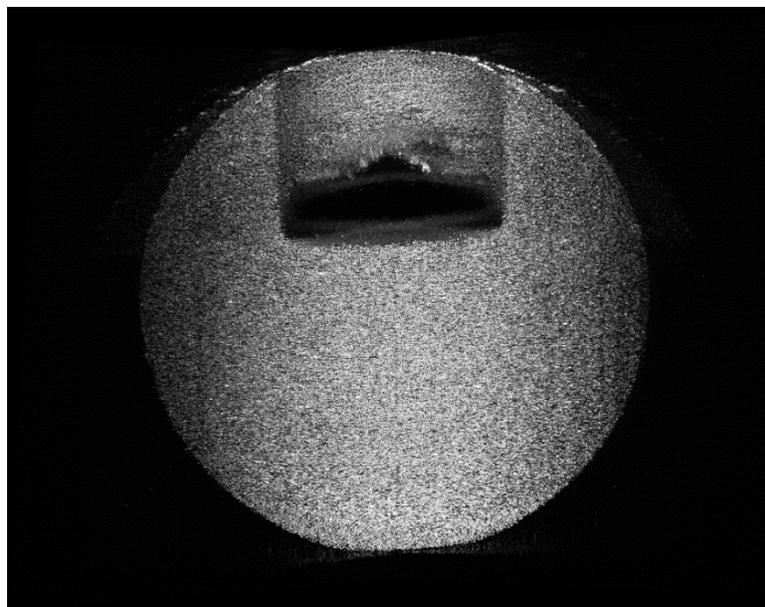


Figura 6-13 – Imagem obtida a partir da intensidade mínima, em cada pixel, das imagens obtidas a partir do máximo de intensidade, para o ponto 10ms a montante da bolha.

Como neste trabalho foram rodados casos de diversos pontos de interesse, foi desenvolvido um código, em MATLAB, para detectar a região de obstrução e de bolha alongada automaticamente. O resultado para o ponto 10ms a montante da bolha está exposto na Figura 6-14.

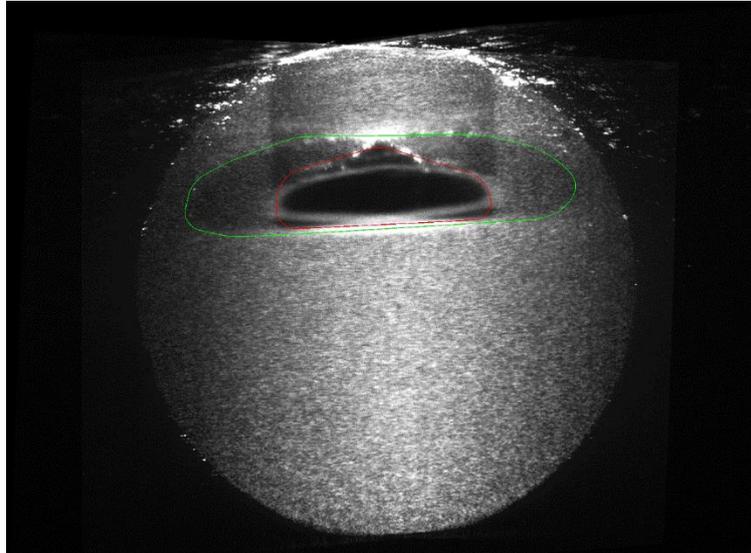


Figura 6-14 – Delimitação automática da região de bolha alongada (contorno vermelho) e de obstrução (contorno verde), para o caso -10ms.

7 Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos para o escoamento intermitente e para o escoamento monofásico, ambos medidos a partir das técnicas já descritas nos capítulos anteriores. Os resultados do caso monofásico serão descritos primeiro, de maneira breve, pois foram utilizados para a validação da metodologia empregada. Em seguida, os resultados para o escoamento intermitente serão apresentados em mais detalhes, por serem o foco do presente trabalho.

Durante a apresentação dos dados, será adotada a convenção que as componentes do vetor de velocidade na direção x , y e z serão denominadas u , v e w . No referencial adotado, a direção z segue a direção principal do escoamento, a direção y é paralela à força gravitacional e a direção x é ortogonal à direção y e à direção z .

7.1. Escoamento de validação monofásico

Conforme descrito na seção 6.3, o perfil de velocidade, na direção principal, para um escoamento laminar, hidrodinamicamente desenvolvido, de um fluido Newtoniano, em um tubo circular, deve ser parabólico. A Figura 7-1 mostra a comparação do perfil de velocidades médio de 350 campos, medido com a técnica de SPIV, o perfil teórico esperado. São comparados os perfis correspondentes à direção horizontal e vertical da componente principal do vetor velocidade, ambos avaliados nos pontos da malha mais próximos ao centro da tubulação. É possível observar que, para ambos os casos, os valores estão em acordo com o esperado.

É de conhecimento da literatura que, para o escoamento laminar descrito no parágrafo acima, a velocidade média na área transversal da tubulação corresponde a metade da velocidade máxima. Assim, a vazão do líquido pode ser calculada através da equação abaixo.

$$Q = \frac{w_{max}}{2} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \quad (7.1)$$

A partir da equação (7.1) e das medições de SPIV, a vazão foi obtida como aproximadamente 1,7 m³/h, que corresponde à vazão medida fornecida pela bomba, para este escoamento monofásico.

O campo médio da componente axial da velocidade na seção transversal pode ser observado na Figura 7-2. O escoamento apresenta simetria em torno do centro, conforme esperado, sendo esta, mais uma indicação que a técnica foi implementada corretamente.

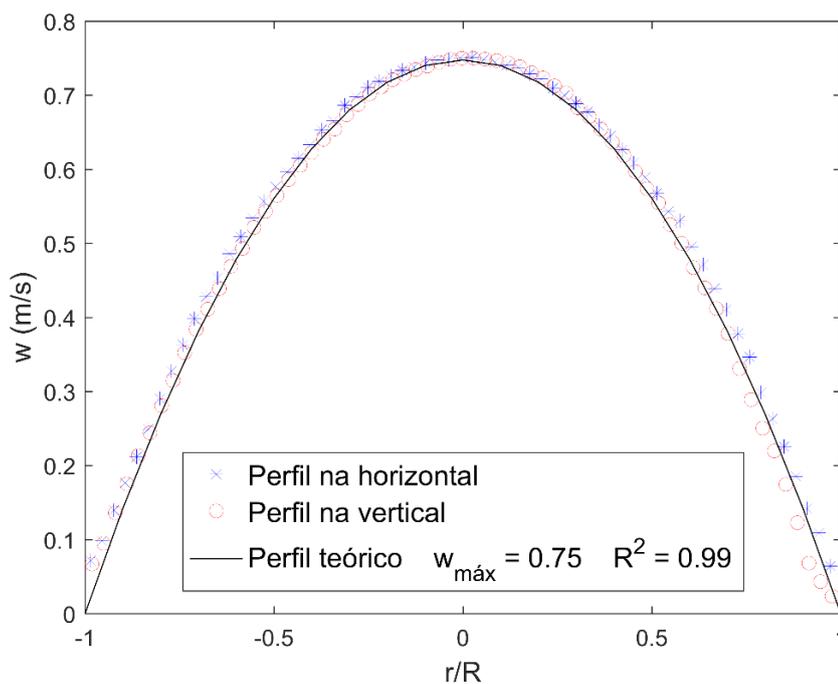


Figura 7-1 - Comparação do perfil de velocidades medido, ao longo da direção X e Y, com o perfil teórico.

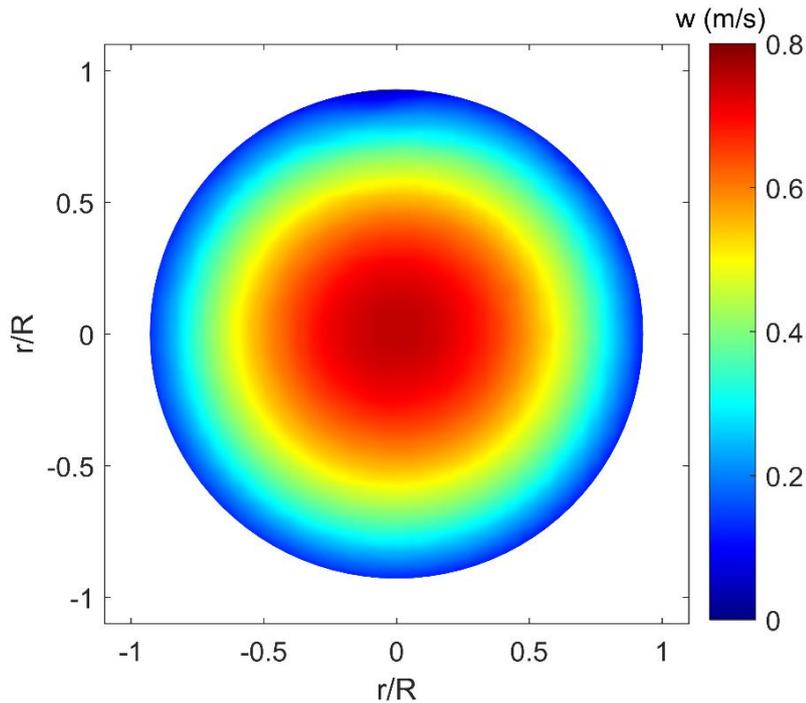


Figura 7-2 – Campo médio da componente de velocidade na direção principal do escoamento na seção transversal da tubulação. A simetria observada é um indício da correta aplicação da técnica.

Além de ser utilizado para validar a técnica de PIV estereoscópico, o escoamento monofásico hidrodinamicamente desenvolvido também foi utilizado para determinar a incerteza da técnica utilizada. Em toda técnica experimental, existem incertezas associadas às medidas efetuadas e à técnica utilizada. De acordo com Sciacchitano et al. (2014), ainda não há um consenso sobre como quantificar as incertezas associadas à técnicas de PIV. Por esse motivo, neste trabalho, a incerteza da técnica foi estimada a partir da resolução da interpolação subpixel utilizando um ajuste Gaussiano de três pontos em torno do pico da correlação cruzada das janelas de interrogação, que, de acordo com Raffel et al. (2007), é de cerca de 0,05 pixel, o que corresponde, neste trabalho, a aproximadamente 0,01m/s.

A incerteza associada às medidas do campo médio de velocidades, foi estimada a partir da flutuação das velocidades em torno da média, calculada através do valor médio quadrático (RMS, *root mean square*) de 300 campos vetoriais, uma vez que, em escoamentos laminares deste tipo, as flutuações de velocidade devem ser nulas. Obtiveram-se os seguintes

valores: $u_{rms} = 0,01\text{m/s}$, $v_{rms} = 0,005\text{ m/s}$ e $w_{rms} = 0,023\text{m/s}$. A incerteza padrão das medições computada de acordo com a equação (7.1) (INMETRO, 2008), para a componente w do vetor, foi da ordem de 10^{-3} m/s .

$$\delta_{padr\tilde{a}o} = \frac{w_{rms}}{\sqrt{N}} \quad (7.1)$$

Devido ao elevado número de medidas utilizadas, a incerteza padrão da medição da velocidade média, retornou um valor consideravelmente menor que a incerteza associada à interpolação na medição dos deslocamentos das partículas traçadoras. Dessa forma, o valor utilizado para representar a incerteza da técnica foi dominado pela incerteza na interpolação, sendo, portanto, de cerca de $0,01\text{m/s}$.

7.2. Estatísticas do escoamento intermitente

Antes da apresentação dos resultados do campo de velocidades para o escoamento bifásico, serão apresentados, nesta seção, os resultados dos dados estatísticos que caracterizam o escoamento intermitente produzido na seção de testes utilizada. Serão apresentados os dados estatísticos de comprimento do pistão de líquido e velocidade de translação da bolha alongada, obtidos através do arranjo de interruptores de feixe.

7.2.1. Comprimento do pistão de líquido

A análise do comprimento do pistão de líquido é um dos parâmetros que devem ser avaliados para determinar se o escoamento intermitente já se encontra desenvolvido. A partir do histograma apresentado na Figura 7-3, é possível observar duas regiões de distribuição de tamanho do pistão distintas. É provável que alguns pistões se encontrassem desenvolvidos, ou perto do desenvolvimento, o que corresponderia à distribuição dos

pistões maiores, enquanto a região dos pistões menores representaria aqueles que ainda não haviam se desenvolvido.

De acordo com diversos trabalhos na literatura, como os de Nydal et al. (1992) e Ujang et al. (2006), a distribuição que melhor representa o comprimento dos pistões desenvolvidos é a distribuição log-normal. Desta maneira, para dar embasamento à afirmação do parágrafo anterior, a distribuição dos pistões acima de 16D foi submetida ao teste de aderência de *Anderson-Darling*, para distribuição log-normal (Montgomery, et al., 2003). A análise dos resultados mostrou que os dados seguem uma log-normal ao nível de significância de 5%. As Figura 7-4 e Figura 7-5 e ilustram o papel de probabilidade e o histograma dos pistões acima de 16D, respectivamente.

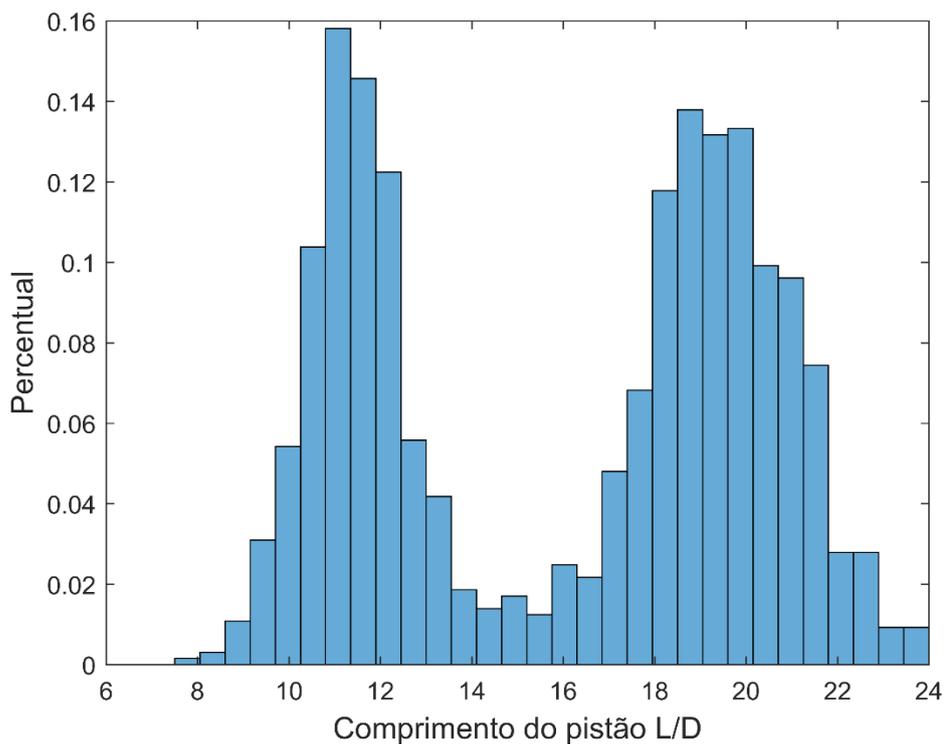


Figura 7-3 - Histograma do comprimento do pistão de líquido para o escoamento intermitente estudado.

Apesar dos indícios de que a região a direita do gráfico da Figura 7-3 possa representar pistões desenvolvidos, tal afirmação só poderia ser confirmada com a medição simultânea da velocidade do nariz da bolha e

da cauda da bolha a jusante, o que não foi efetuado neste trabalho. A análise dos pistões permite afirmar, apenas, que, na região de medição, diversos pistões não se encontravam desenvolvidos. Seria necessário, portanto, uma seção de testes com comprimento de tubulação maior que a que foi utilizada no presente trabalho.

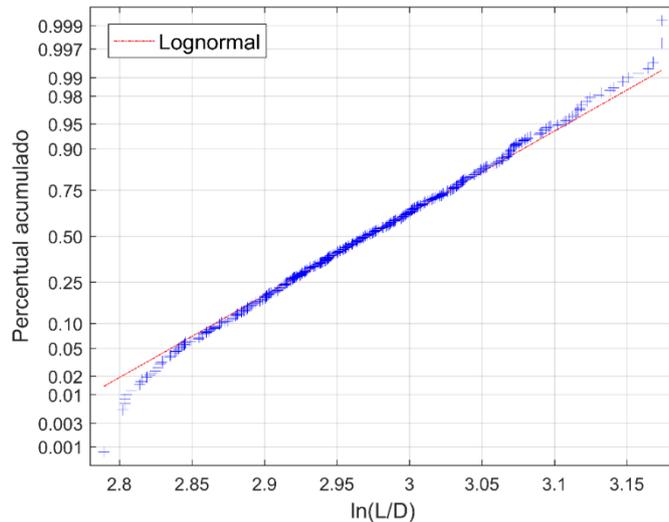


Figura 7-4 - Papel de probabilidade do logaritmo do comprimento do pistão de líquido para pistões maiores que 16D

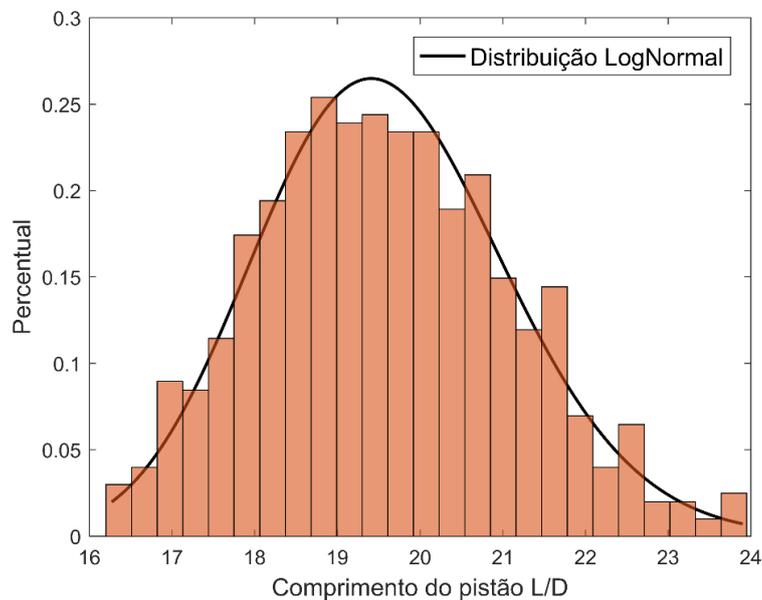


Figura 7-5 - Histograma do comprimento do pistão de líquido para pistões maiores que 16D.

7.2.2. Velocidade de translação do nariz da bolha alongada

Conforme descrito na seção 6.4, a velocidade da frente da bolha alongada será utilizada para transformar o tempo entre as imagens, em espaço, usando o nariz da bolha como referencial.

Como o comprimento dos pistões de líquido variava significativamente, conforme mostrado na seção 7.2.1, foi necessário verificar se o mesmo ocorreria com a velocidade da frente da bolha alongada, o que inviabilizaria a utilização desta velocidade como fator de conversão de tempo para espaço. A partir do histograma apresentado na Figura 7-6, é possível verificar que, apesar do comprimento dos pistões apresentar uma distribuição em duas regiões distintas, uma para pistões até 16D e outra para pistões maiores que este valor, a velocidade de translação da frente das bolhas alongadas segue uma distribuição que independe do tamanho dos pistões.

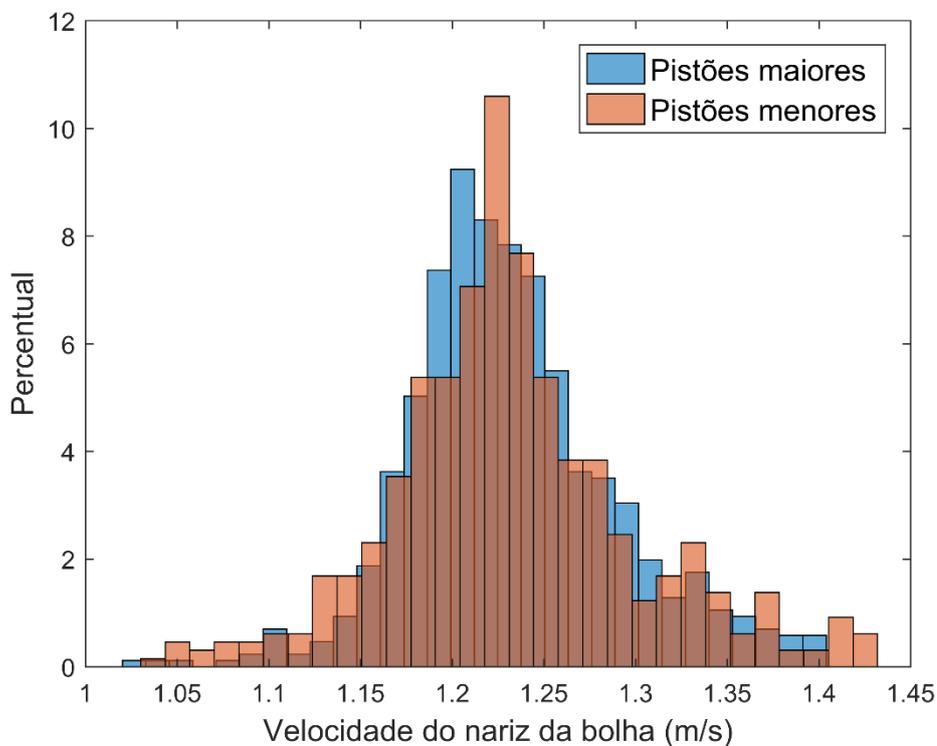


Figura 7-6 - Histograma da velocidade de translação do nariz da bolha alongada para as duas regiões de comprimento do pistão de líquido.

Apesar da velocidade de translação da frente da bolha alongada ser distribuída em apenas uma região, esta não segue uma distribuição normal ou log-normal. Estimar o intervalo de confiança da média a partir da distribuição t-student, levaria, portanto, a valores imprecisos. Para contornar o problema descrito, foi utilizado o teorema do limite central, que garante que a distribuição de médias de amostras retiradas aleatoriamente de uma população, quando o número de amostras é grande, converge para uma distribuição normal (Montgomery, et al., 2003). A Figura 7-7 mostra o histograma da média da velocidade de translação do nariz da bolha após 1000 reamostragens, cada uma baseada na média de 500 valores. A distribuição gerada foi aprovada no critério de normalidade de *Anderson-Darling*, e a velocidade média foi calculada como 1,2255 m/s, com 95% de intervalo de confiança de 1,2254 m/s a 1,2257 m/s.

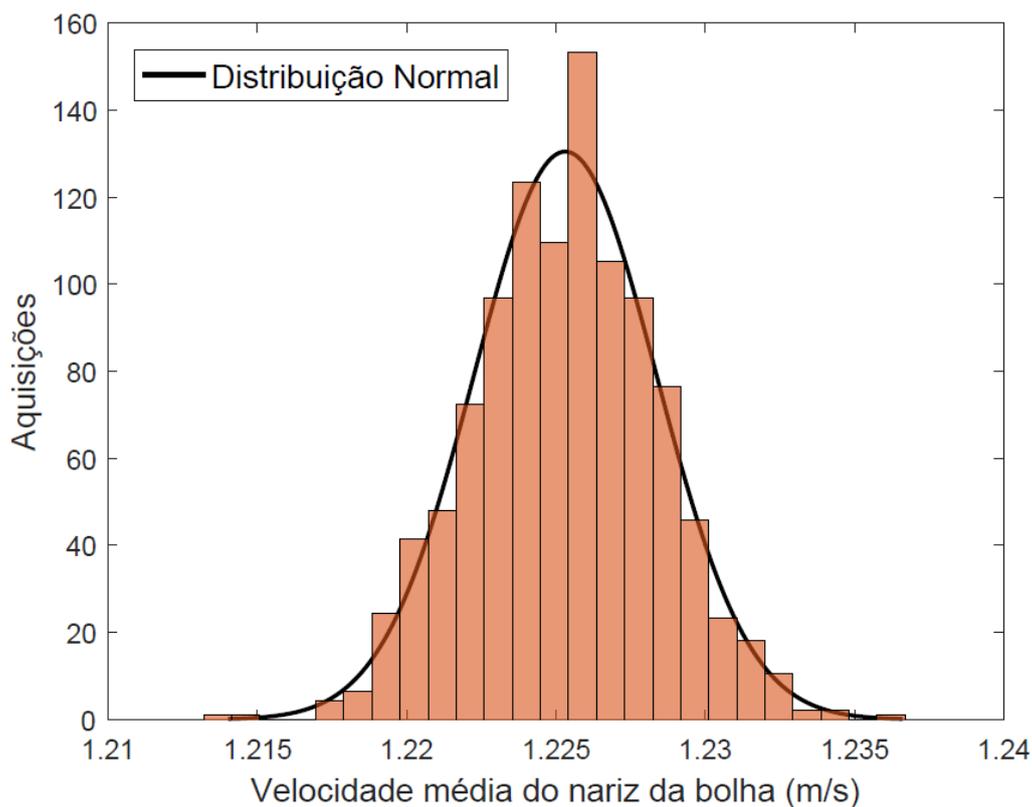


Figura 7-7 - Histograma da média das 1000 reamostragens da velocidade de translação do nariz da bolha alongada.

7.3. Campos vetoriais do escoamento intermitente

Nesta seção, serão apresentados os campos vetoriais obtidos com a técnica de SPIV. A fim de facilitar a análise, esta seção será dividida em campos obtidos na região de pistão de líquido e região de filme líquido (a montante e a jusante da bolha alongada). O nariz da bolha sempre será utilizado como referencial de posição. Assim, cada campo vetorial estará a um intervalo de tempo conhecido, em milissegundos, do nariz da bolha. A partir da velocidade média de translação da bolha alongada, obtida na seção 7.2.2, o intervalo de tempo pôde ser transformado em distância, como será mostrado nas próximas páginas. A Figura 7-8 mostra um esquema representativo dos pontos de aquisição, ao longo da célula unitária.

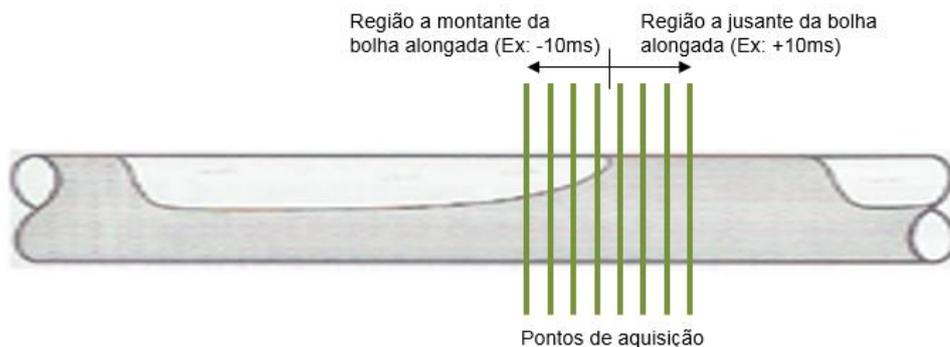


Figura 7-8 – Esquema dos pontos de aquisição, ao longo da passagem de uma célula unitária.

7.3.1. Região do pistão de líquido

Os dados apresentados nesta seção são aqueles obtidos na região de pistão de líquido. Cada resultado apresentado é baseado na média de 150 campos vetoriais e a análise é feita após a apresentação das imagens.

Inicialmente, será apresentado o perfil axial do vetor velocidade, ao longo da vertical, na posição horizontal central do tubo ($x = 0$) nos pontos de 2ms (0,06 D) e 14ms (0,36 D), figura 7.9, e, em seguida, a evolução deste para regiões a jusante da bolha alongada (figura 7.10 a 7.12).

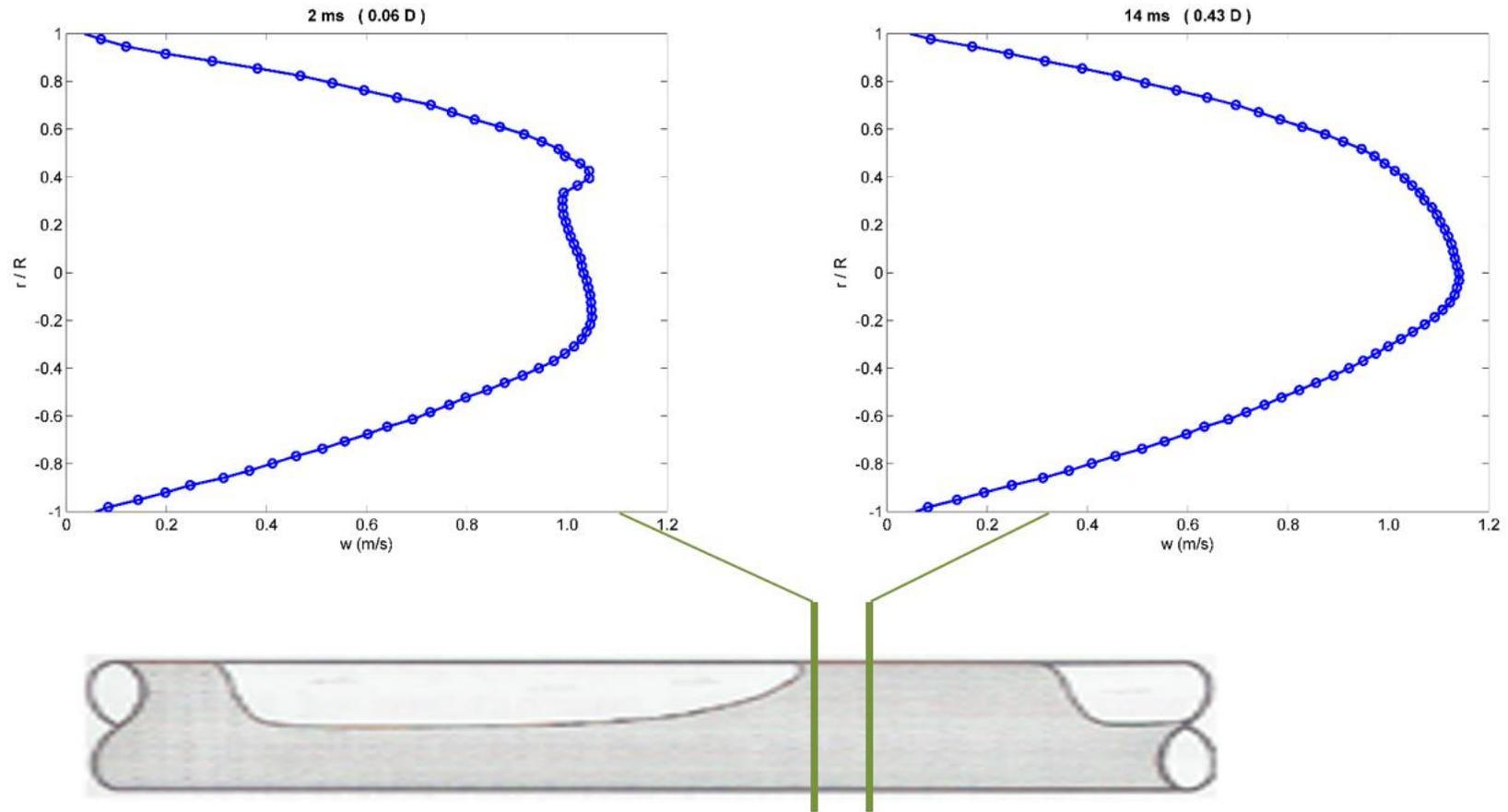


Figura 7-9 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos +2ms e +14ms a jusante da bolha alongada. A posição na bolha alongada das figuras está fora de escala.

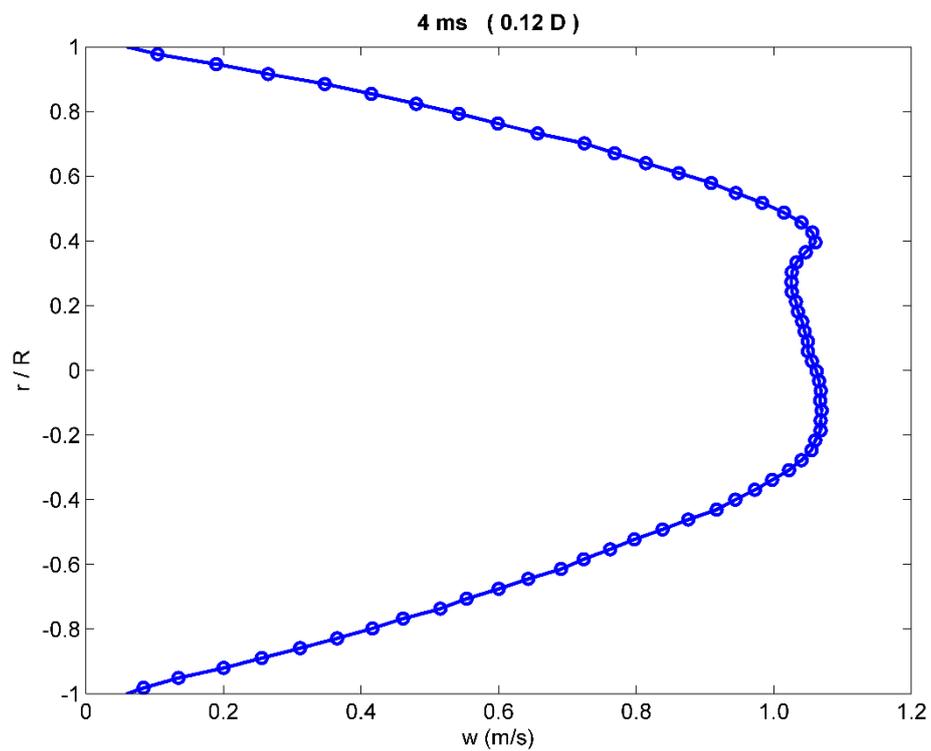
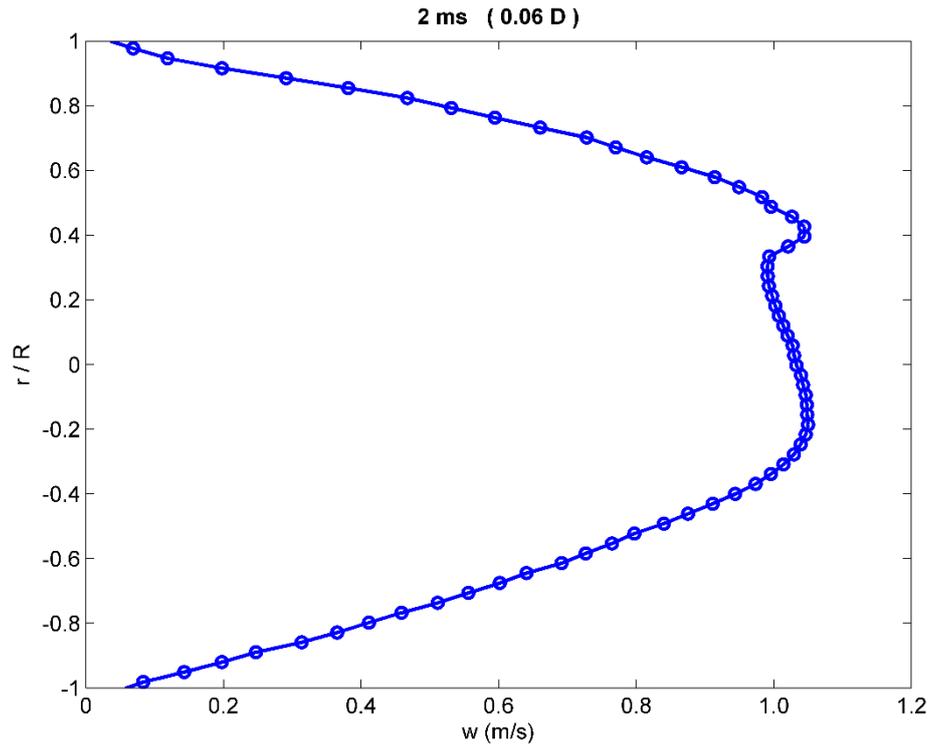


Figura 7-10 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos +2ms e +4ms a jusante da bolha alongada.

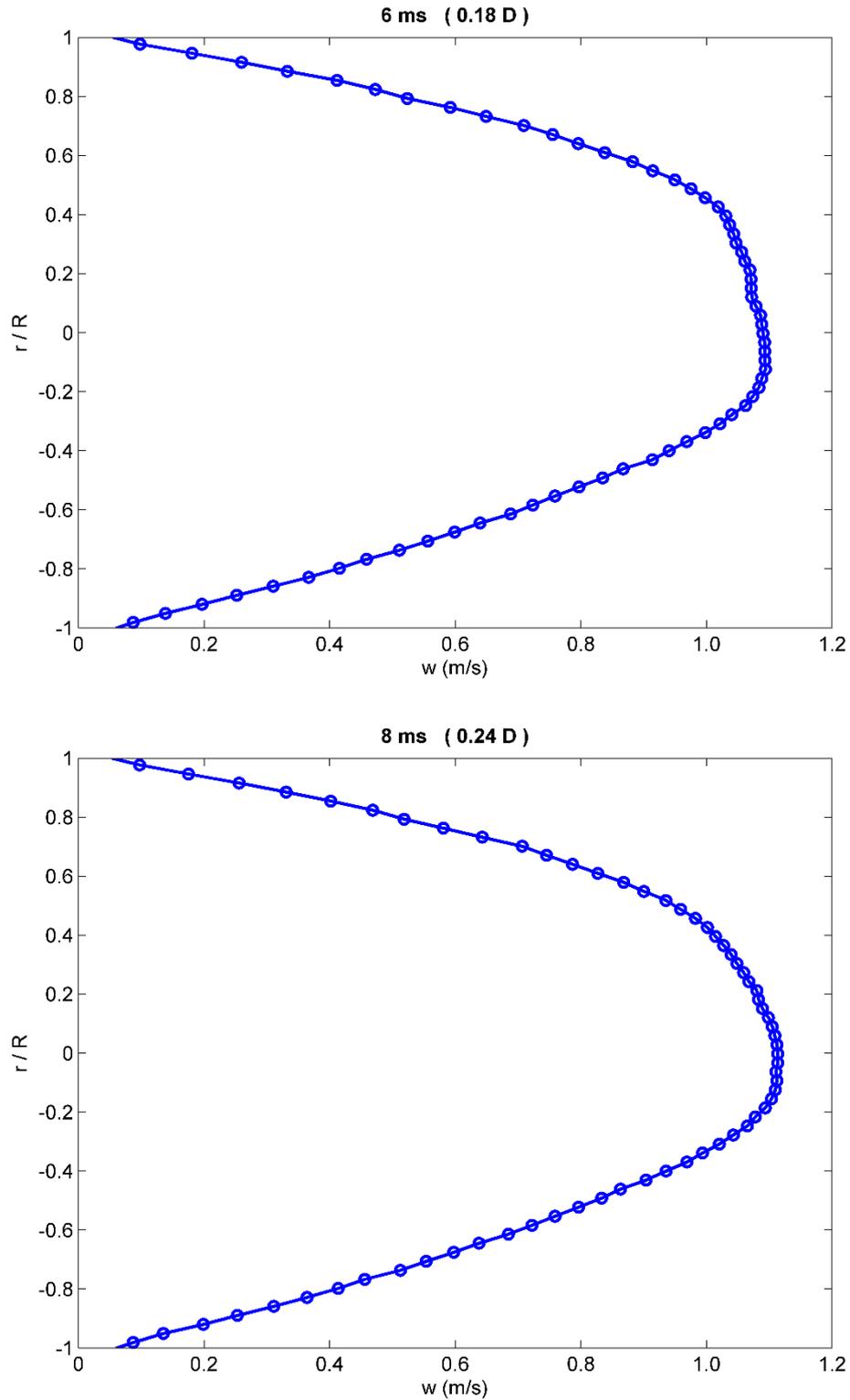


Figura 7-11 - Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada.

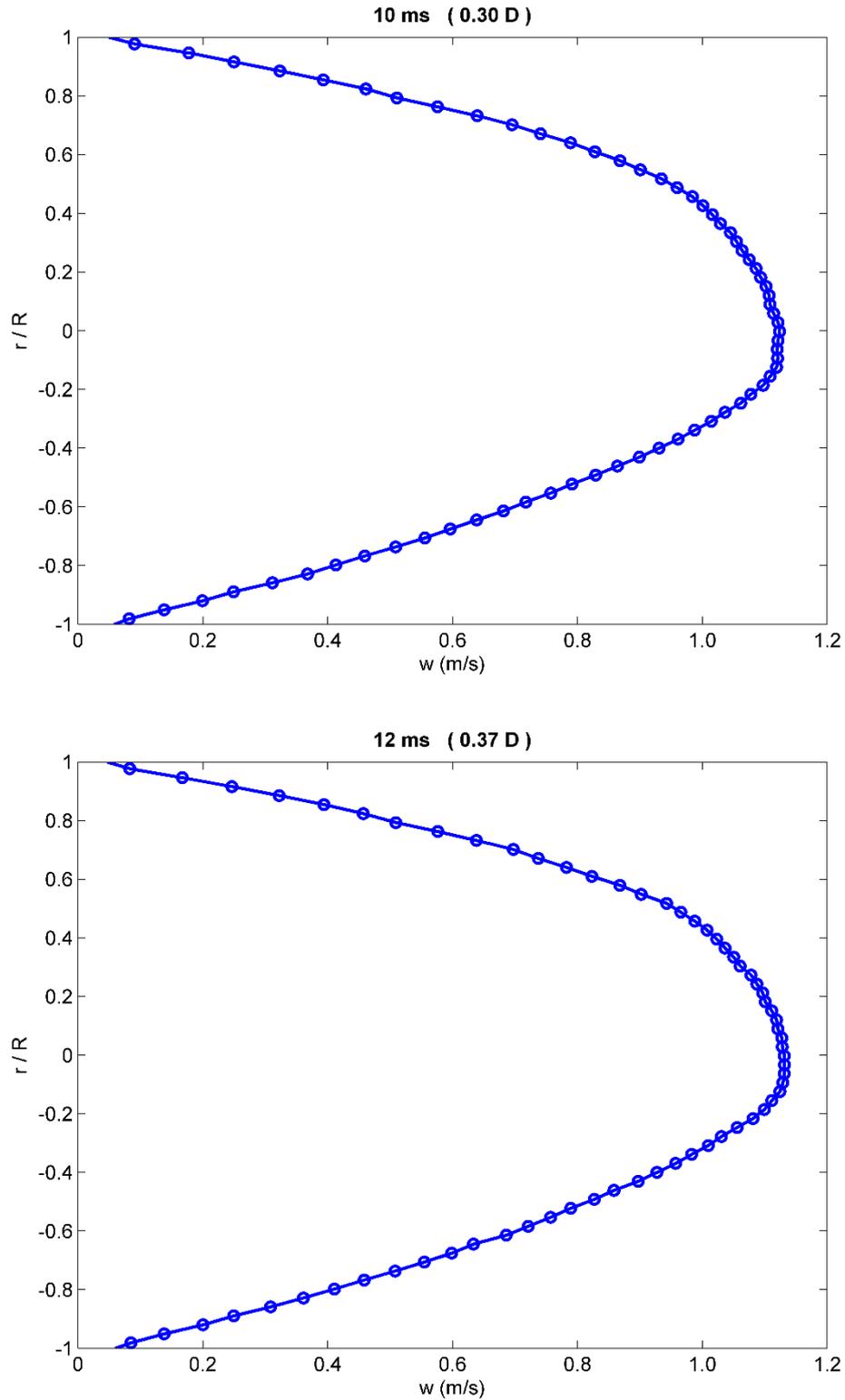


Figura 7-12 - Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada.

A análise da Figura 7-10 mostra uma deformação considerável no perfil do componente w da velocidade no ponto $+2ms$ ($0,06D$ a jusante do nariz da bolha). São observados dois pontos de máximo, com o maior valor da amplitude da velocidade na região superior da tubulação, provavelmente como consequência da chegada iminente da bolha alongada, que, por se mover mais rápido que o líquido no pistão, desloca o líquido da região à sua frente. É possível observar, também, que o líquido, como um todo, sofre uma desaceleração próximo a bolha, possivelmente pelo fato da velocidade, na região de filme líquido, ser menor que no pistão de líquido. Nas figuras 7.11 e 7.12, percebe-se que para pontos um pouco mais afastados da bolha, nas posições de $+6$ a $+12ms$ ($0,18D$ a $0,37D$ a jusante do nariz da bolha), a área ocupada pelo perfil de velocidade é maior na metade superior da tubulação, o que indica uma maior vazão volumétrica nessa região, apesar do ponto máximo da componente w se encontrar ligeiramente abaixo do eixo central da tubulação. Este fenômeno também pode ser explicado pela chegada da bolha alongada, com uma velocidade mais elevada que o líquido no pistão. As observações acima, para o perfil de velocidade na direção axial, mostram uma tendência semelhante àquela observada por Fonseca Junior (2010).

Serão apresentados, em seguida, os campos de velocidade das componentes u , v e w dos vetores de velocidade na seção transversal da tubulação. Nas figuras mostrando a componente w na seção transversal, serão apresentados também vetores representando as componentes u e v . A análise desses dados será feita após a apresentação sequencial, da figura 7.13 à 7.21.

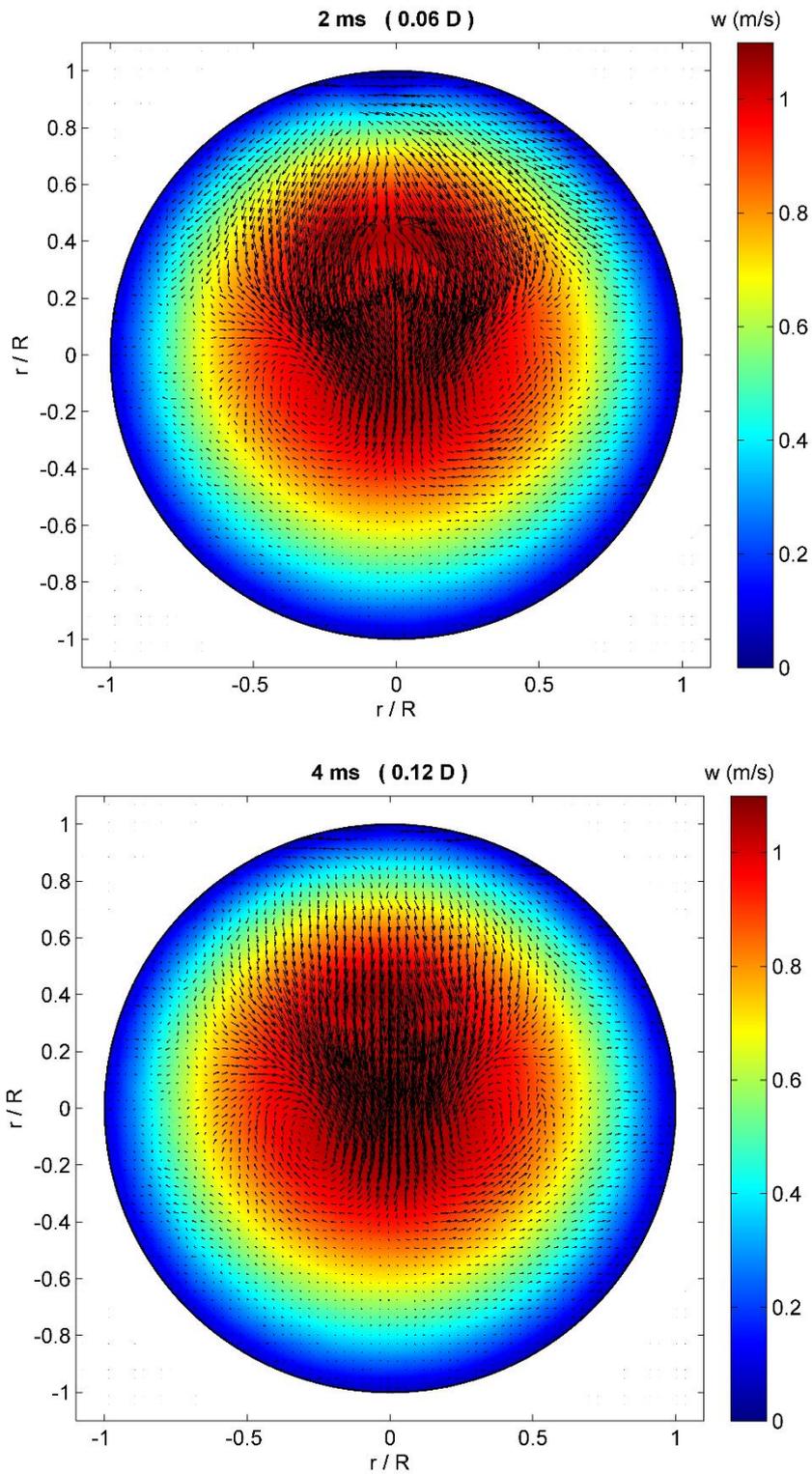


Figura 7-13 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos +2ms e +4ms a jusante da bolha alongada.

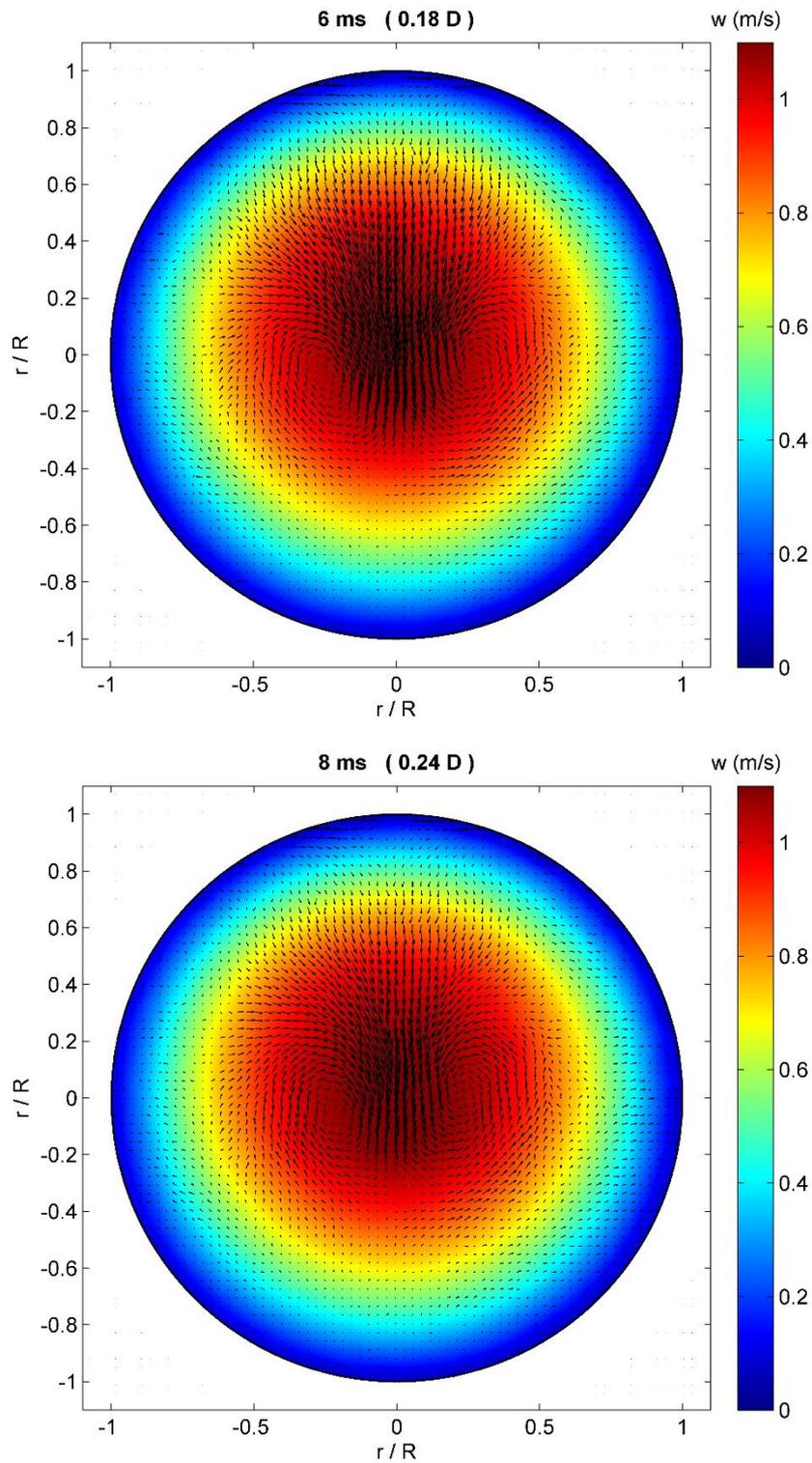


Figura 7-14 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada.

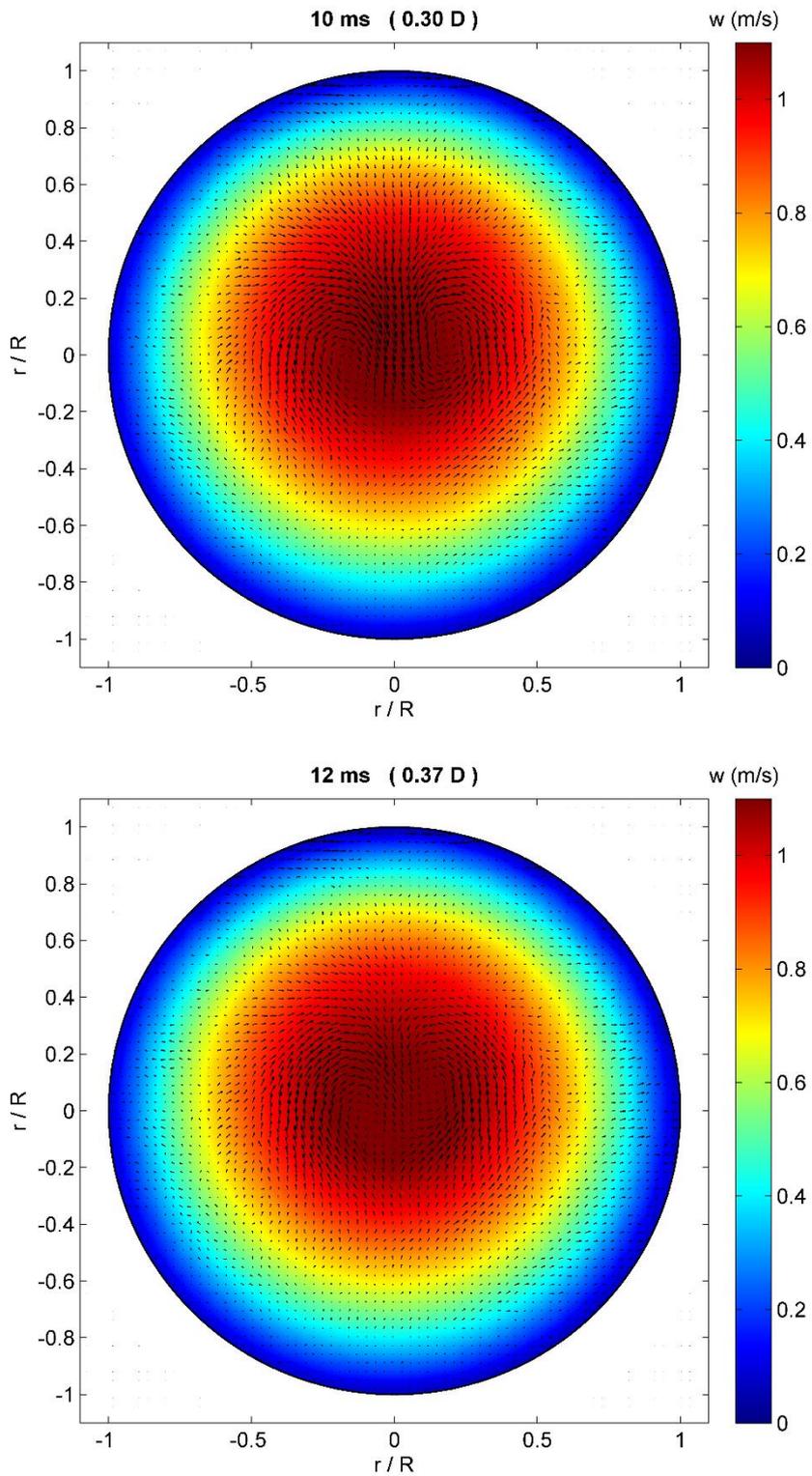


Figura 7-15 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos +10ms e +12ms a jusante da bolha alongada.

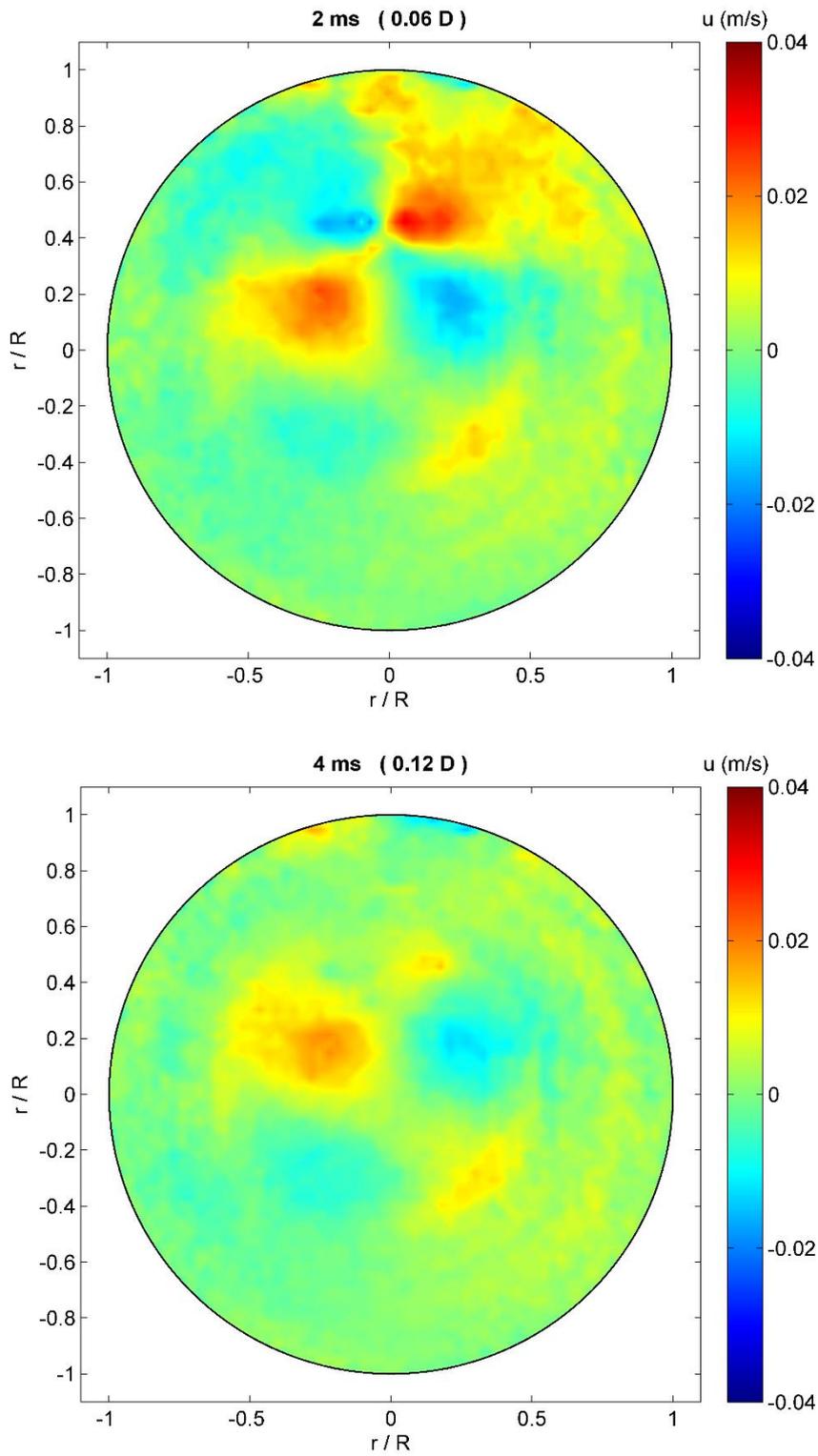


Figura 7-16 – Campos de velocidade mostrando a componente u em cores para os pontos +2ms e +4ms a jusante da bolha alongada.

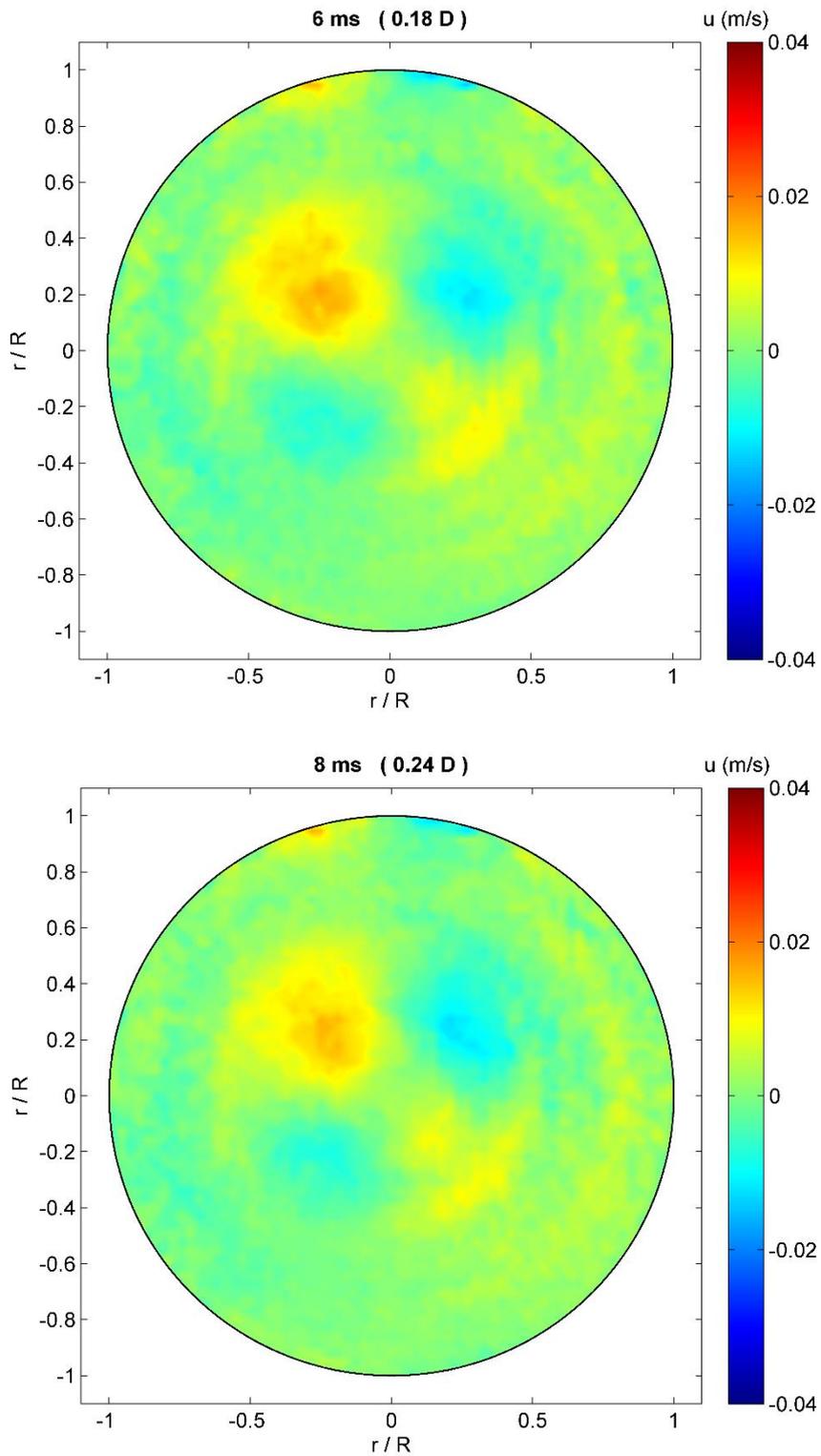


Figura 7-17 – Campos de velocidade mostrando a componente u em cores para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada.

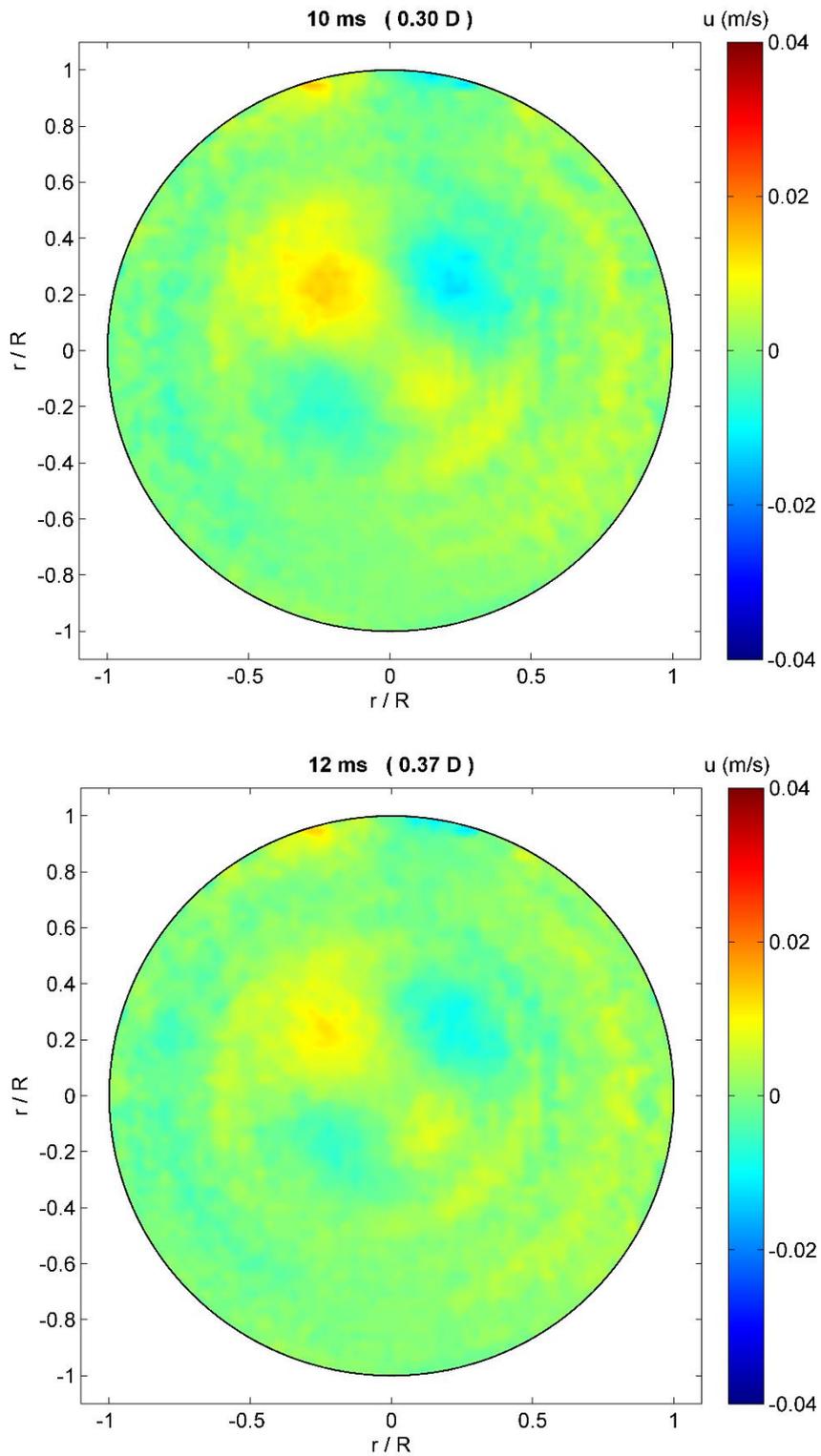


Figura 7-18 – Campos de velocidade mostrando a componente u em cores para os pontos +10ms e +12ms a jusante da bolha alongada.

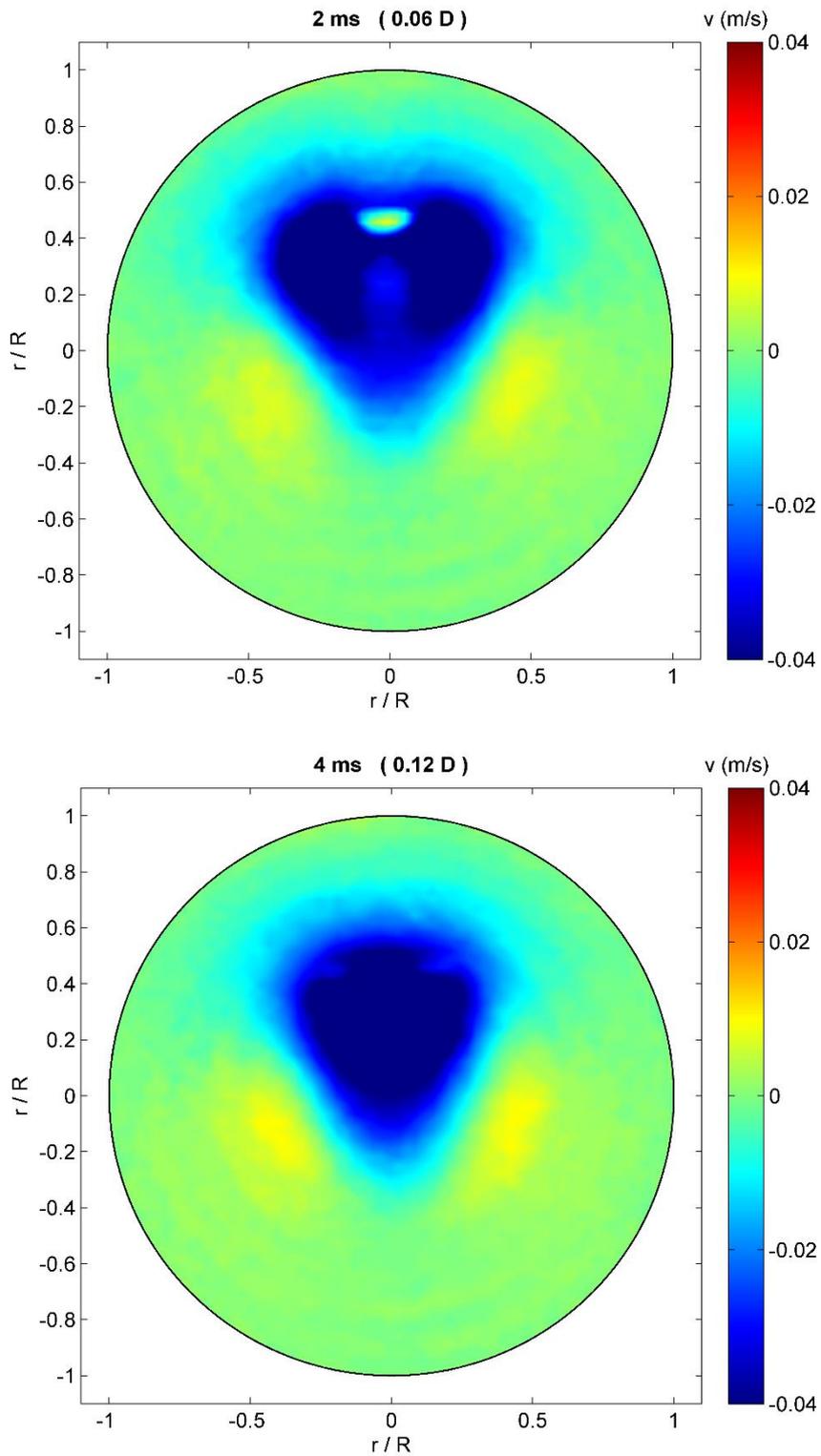


Figura 7-19 – Campos de velocidade mostrando a componente v em cores para os pontos +2ms e +4ms a jusante da bolha alongada.

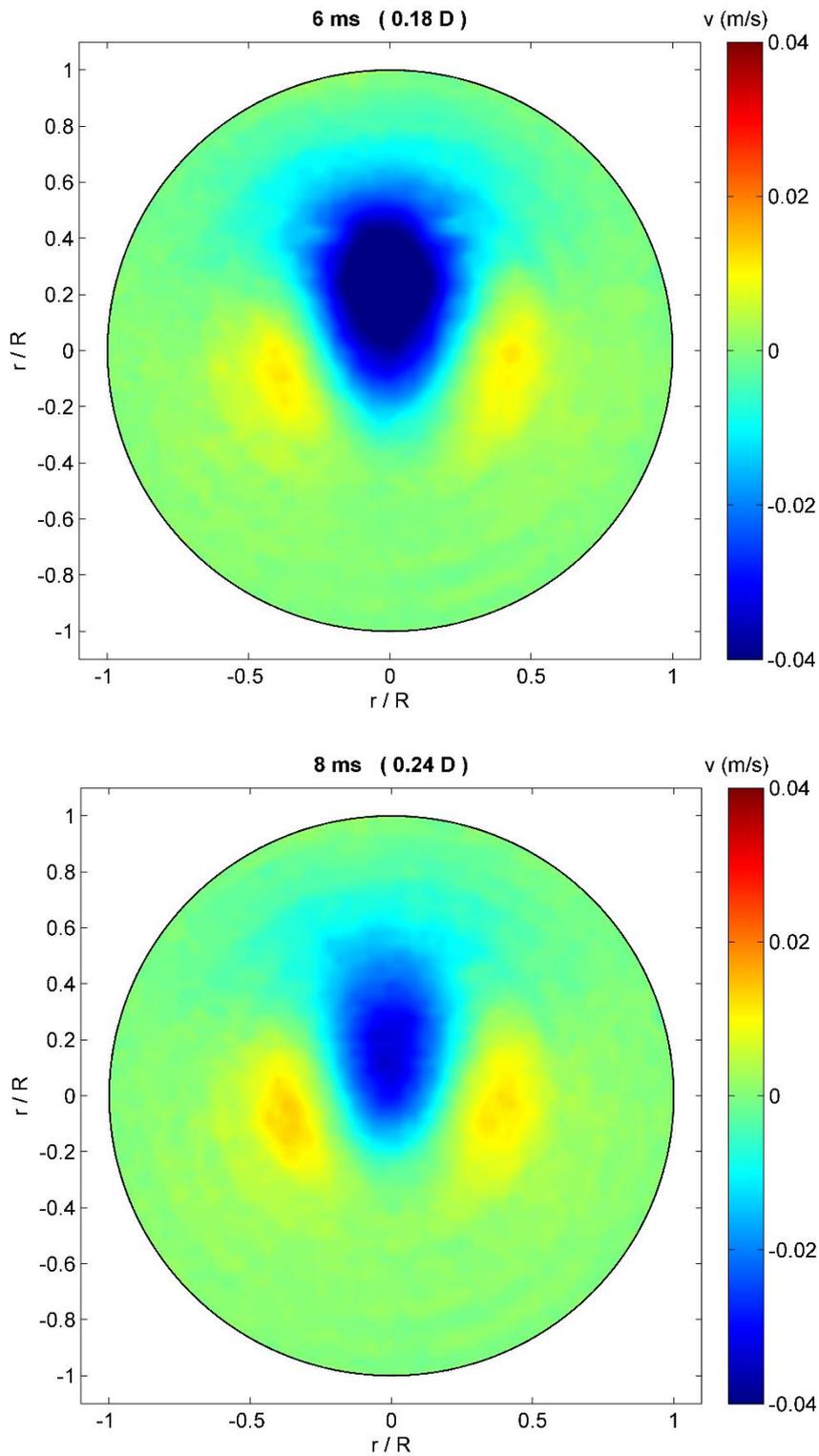


Figura 7-20 – Campos de velocidade mostrando a componente v em cores para os pontos +6ms e +8ms a jusante da bolha alongada.

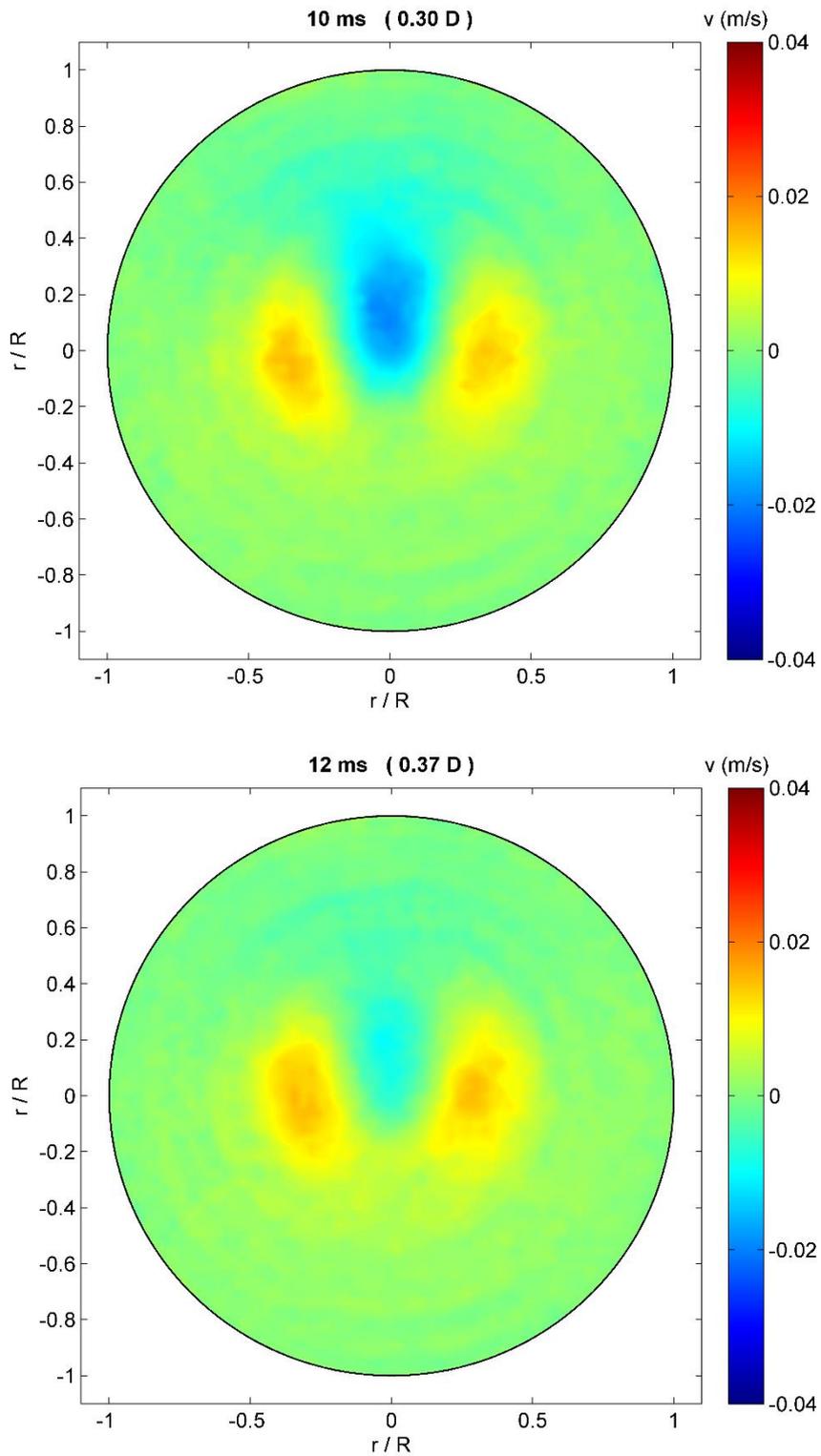


Figura 7-21 – Campos de velocidade mostrando a componente v em cores para os pontos +10ms e +12ms a jusante da bolha alongada.

Analisando os gráficos da componente vertical v do vetor velocidade (Figura 7-199 a 7.21), é possível observar que, de +12 a +8ms (0,37 a 0,24D a jusante do nariz bolha alongada), ocorre uma aceleração do líquido ao longo da seção central da tubulação, no sentido descendente. Como consequência, verifica-se, nas figuras 7.14 e 7.15, a formação de vórtices razoavelmente simétricos, com rotações em sentidos contrários, que explicam as regiões com movimento de fluido ascendente, e com simetria em relação ao eixo vertical ($x=0$). As regiões de recirculação também explicam os valores obtidos para a componente u do vetor velocidade nas regiões de +12 a +8ms (0,37 a 0,24D a jusante da bolha), observados nas figuras 7.17 e 7.18. A medida que a bolha alongada se aproxima da região de medição, o movimento descendente se intensifica, em detrimento do ascendente, e passa a ocupar uma região maior da seção transversal (figura 7.18 e 7.19). Esta tendência diminui a intensidade dos vórtices, e, por esse motivo, a partir do ponto +4ms (0,12D a jusante da bolha alongada), não são mais observadas regiões de recirculação tão bem definidas (figura 7.14). A componente u , nestas regiões, parece existir apenas por efeito do líquido preenchendo o espaço deixado devido ao movimento descendente, para garantir a conservação de massa (figura 7.16). A +2ms (0,6D a jusante do nariz da bolha alongada), a região de movimento descendente se divide (figura 7.19), possivelmente devido a chegada iminente da frente da bolha, enquanto a componente u mostra que o líquido se movimenta, na região superior da tubulação, de modo a se afastar da região que será ocupada pela frente da bolha (figura 7.16). Na região central da tubulação, a componente u ainda indica uma tendência de movimento para as regiões onde a intensidade da velocidade na direção descendente é mais intensa (figura 7.15).

As figuras 7.22 a 7.24 mostram a intensidade da vorticidade na seção transversal da tubulação em +8, +10 e +12ms (0,24, 0,3 e 0,37D a jusante da bolha alongada). Verifica-se que a vorticidade é mais intensa nas regiões onde há recirculação, conforme esperado.

É importante ressaltar que, para alguns casos, a incerteza, estimada na seção 7.1 como sendo de 0,01m/s, se encontra na mesma ordem de grandeza das medidas das componentes de velocidade. Nestas regiões,

os dados devem ser avaliados apenas de maneira qualitativa, não quantitativa.

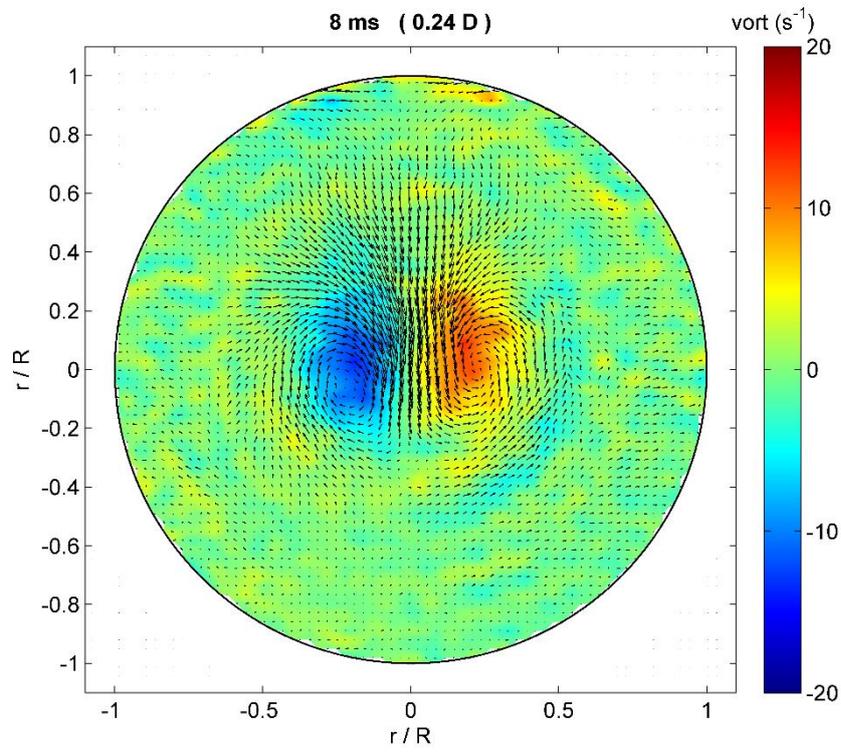


Figura 7-22 – Magnitude da vorticidade, na direção axial, para o ponto 8ms a jusante da bolha alongada.

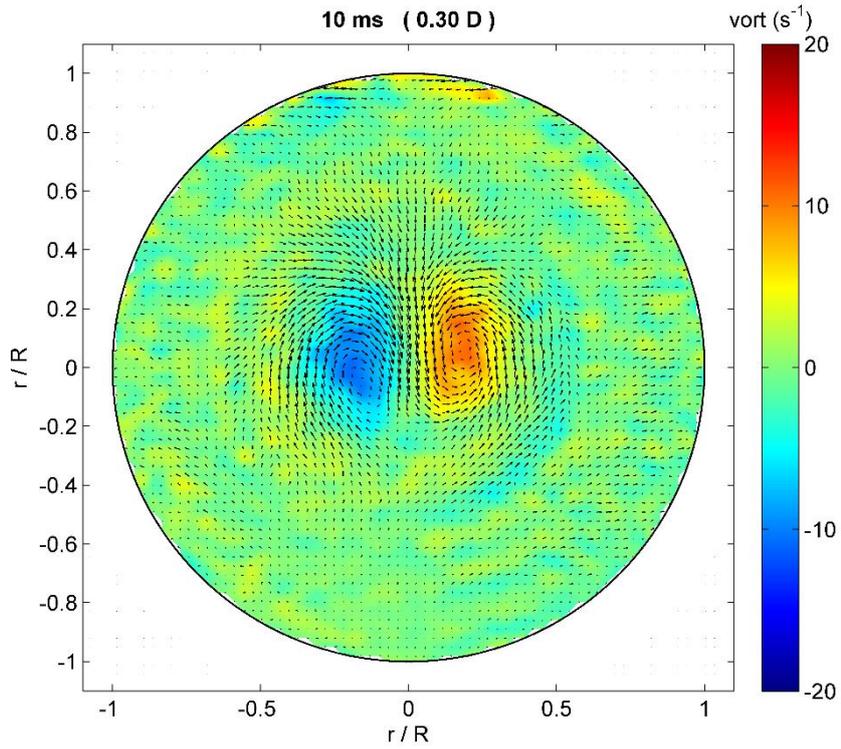


Figura 7-24 – Magnitude da vorticidade, na direção axial, para o ponto 10ms a jusante da bolha alongada.

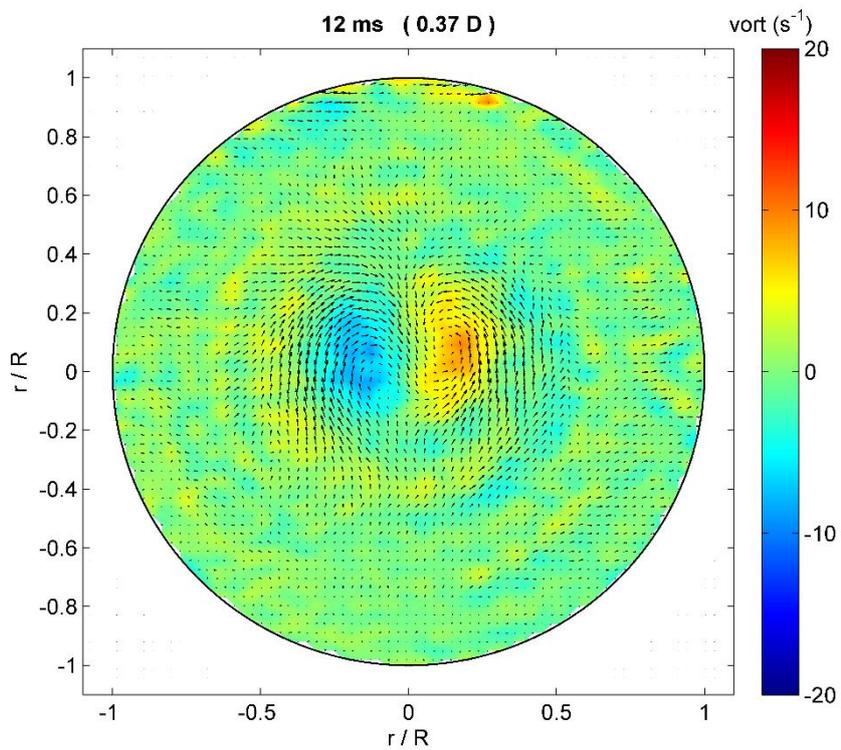


Figura 7-23 – Magnitude da vorticidade, na direção axial, para o ponto 12ms a jusante da bolha alongada.

Para os pontos mais afastados do nariz da bolha, não faz sentido avaliar as componentes u e v do vetor de velocidades, pois estas possuem baixa magnitude. Nesses pontos, é interessante verificar o que ocorreu com o perfil da componente axial do vetor velocidade. Apesar de diversos autores afirmarem que o perfil em regiões mais centrais do pistão tende a se desenvolver hidrodinamicamente, isso não foi observado neste trabalho. A figura 7.24 mostra uma comparação do perfil para diversos pontos a jusante da bolha alongada. É possível observar que não ocorreram variações significativas entre os instantes +50ms (1,52D) e +120ms (3,66D), o que indica que este é o perfil representativo das regiões centrais do pistão de líquido, apesar do perfil de seu valor máximo estar ligeiramente acima do eixo central da tubulação. O ponto +200ms (6,1D a jusante do nariz da bolha) está significamente diferente dos demais, com seu valor ainda mais deslocado para a região superior da tubulação, o que pode ser explicado pelo fato dos valores serem baseados em médias do perfil de velocidade de pistões de diversos tamanhos, com o referencial no nariz da bolha alongada. Por esse motivo, é possível que, devido à sucção causada pela traseira da bolha a montante, conforme reportado por Fonseca Junior (2010) e Sharma et al. (1998), dentre outros, alguns pistões menores sejam os responsáveis por esse desvio.

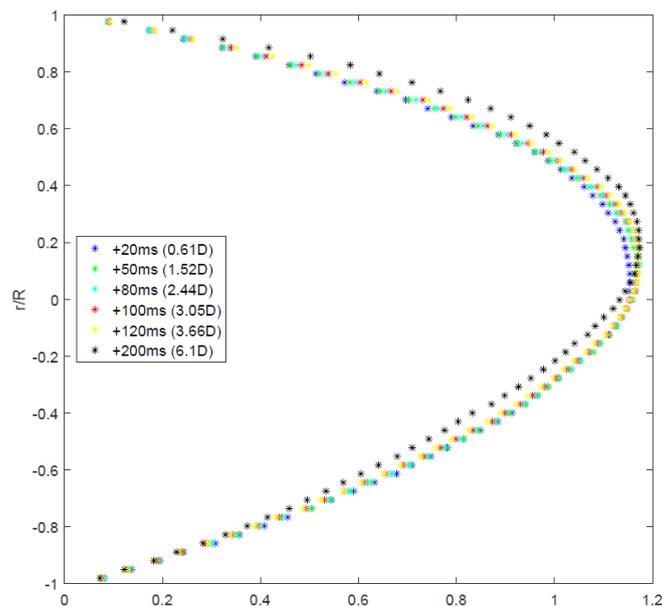


Figura 7-25 – Componente w do vetor velocidade para diferentes pontos a jusante da bolha alongada.

7.3.2. Região do filme líquido

Os dados apresentados nesta seção são aqueles obtidos na região de pistão de filme líquido, a montante do nariz da bolha alongada. Assim como para a região de pistão de líquido, cada resultado apresentado aqui é baseado na média de 150 campos vetoriais.

Inicialmente, serão expostos os dados obtidos nos pontos de 0ms (0D) até -14ms (-0,36 D), espaçado de -2ms (-0,06 D), a montante da bolha alongada. Os pontos escolhidos mostram a evolução das componentes do vetor velocidade desde o primeiro ponto que é possível observar o surgimento da bolha alongada (0ms) até o ponto que, pela limitação da técnica, a região superior do campo vetorial está ocupada inteiramente pela máscara (-14ms). Inicialmente, será apresentado o perfil axial do vetor velocidade, ao longo da vertical, na posição horizontal central do tubo ($x = 0$ nos pontos de 0ms (0D) até -14ms (-0,43 D), espaçados uniformemente de -2ms (-0,06 D), e posicionados a montante da bolha alongada (figuras 7.26 a 7.29).

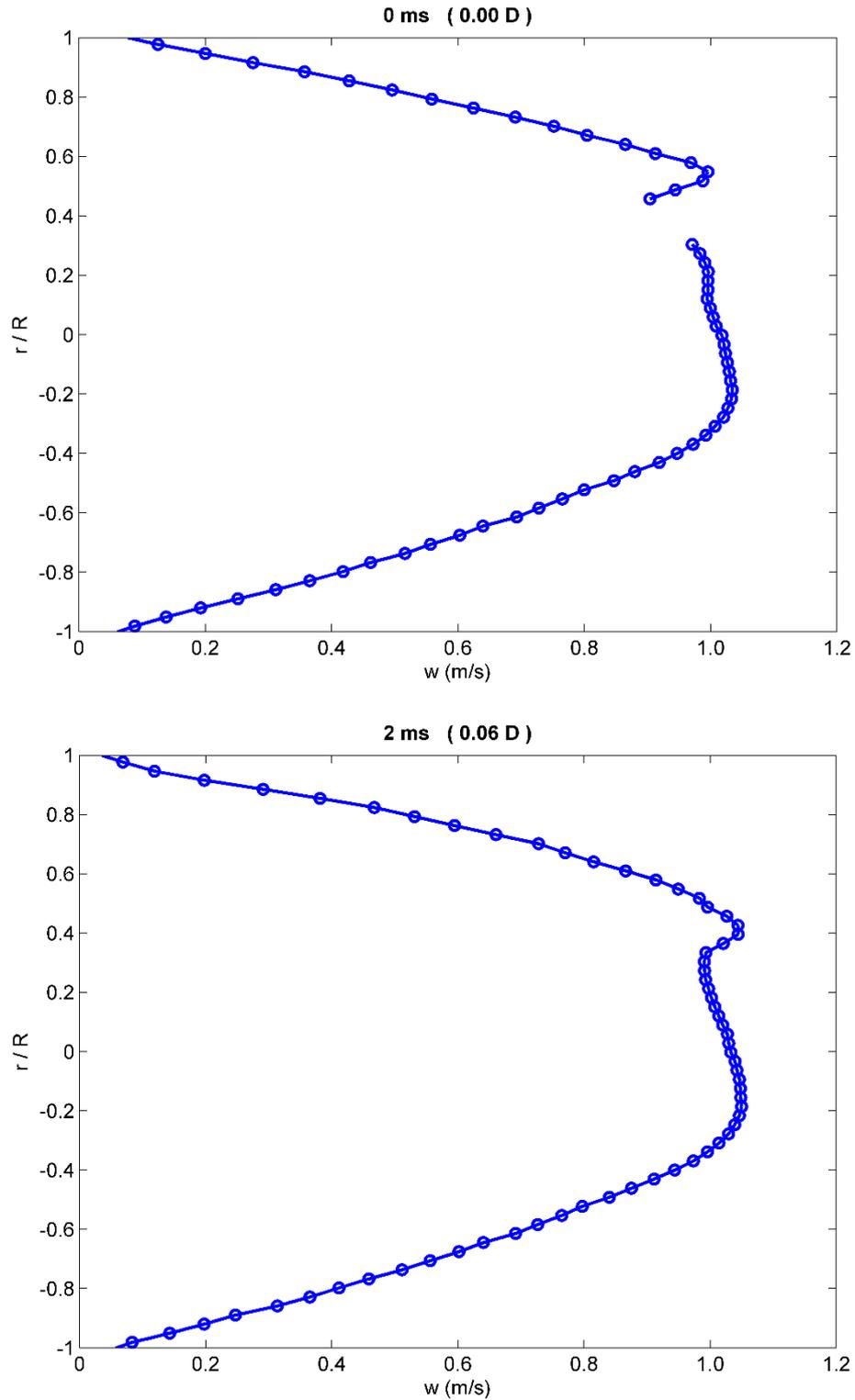


Figura 7-26 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos 0ms e -2ms a montante da bolha alongada.

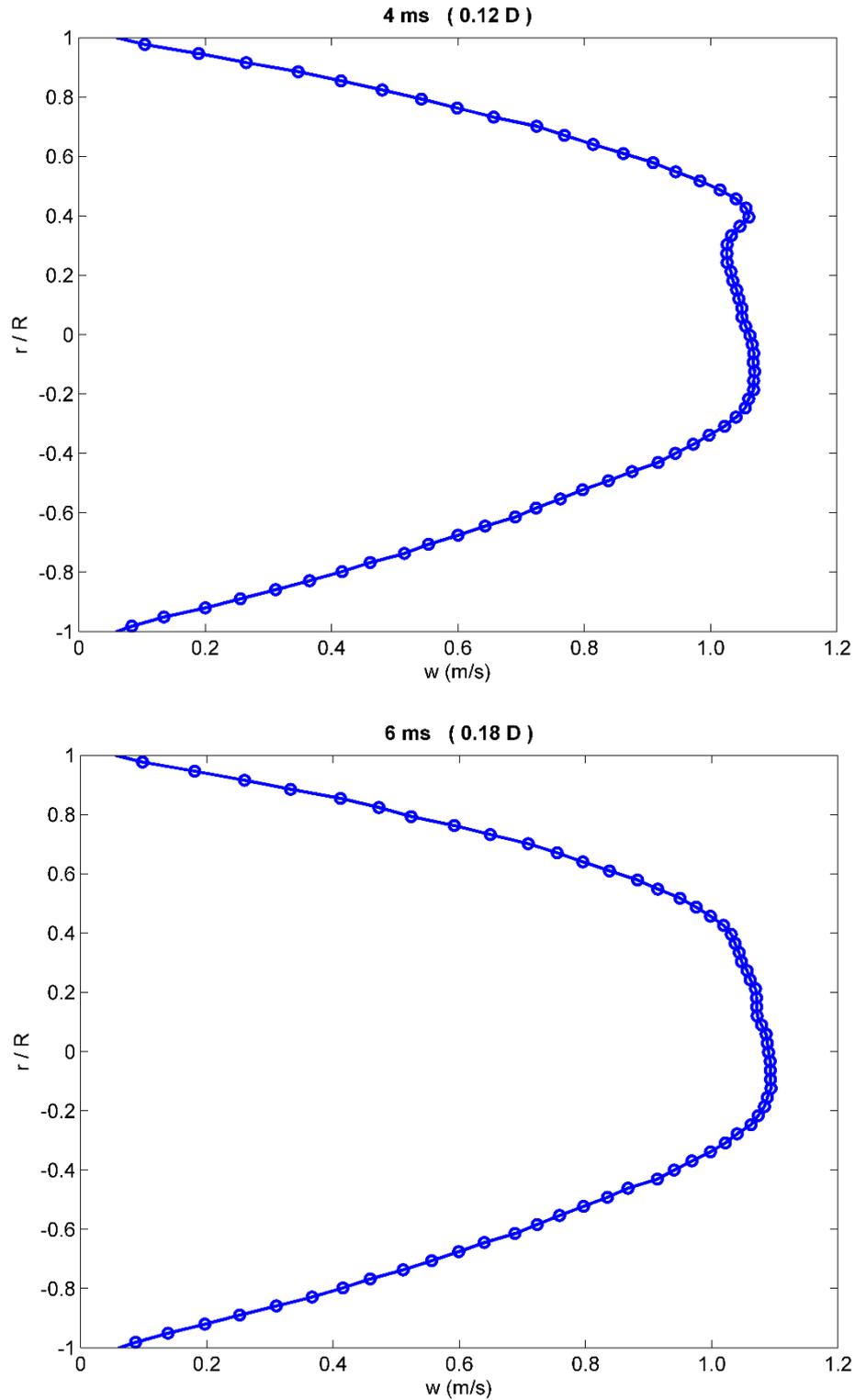


Figura 7-27 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos -4ms e -6ms a montante da bolha alongada.

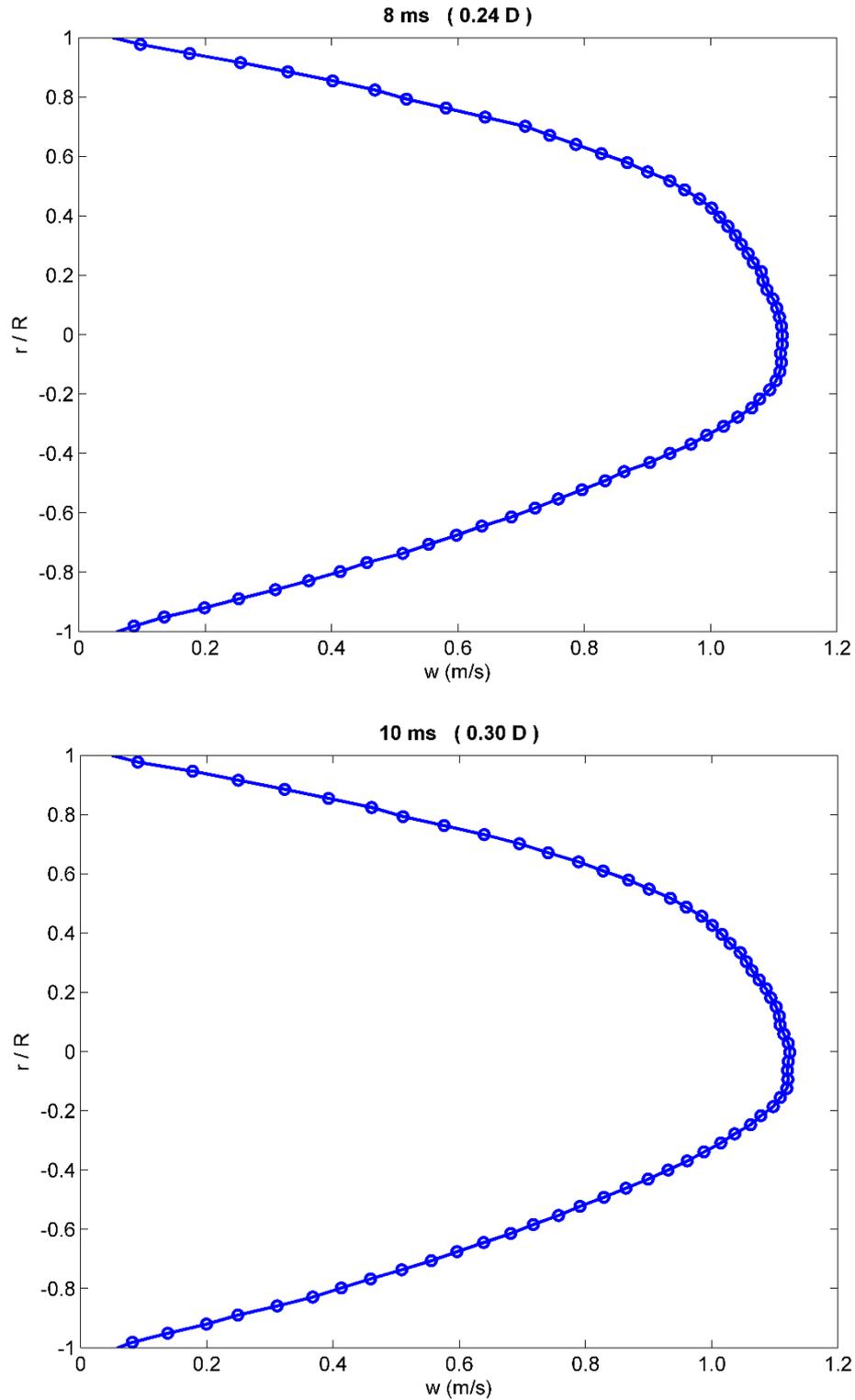


Figura 7-28 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos -8ms e -10ms a montante da bolha alongada.

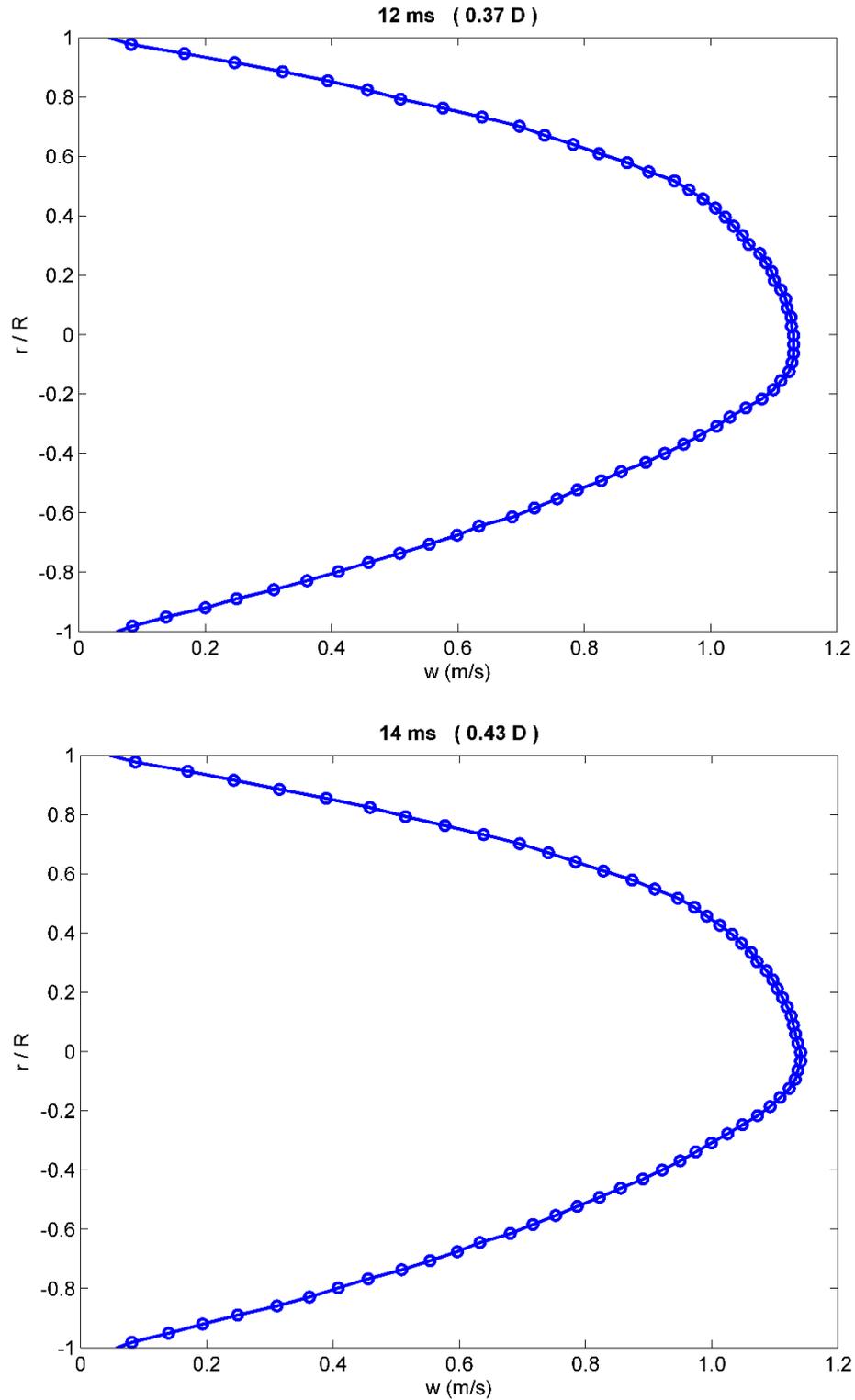


Figura 7-29 – Perfil da componente w do vetor velocidade ao longo da posição $x = 0$ para os pontos -12ms e -14ms a montante da bolha alongada.

A partir da análise do perfil da componente w do vetor velocidade (figura 7.26 a 7.29), é possível observar que a velocidade média da fase líquida diminui entre os pontos -2 a -14ms (-0,06D a -0,43D). Esta tendência pode ser explicada pois, para um sistema de referência que se move com a mesma velocidade da bolha alongada, o líquido presente no filme adquire uma velocidade maior, no sentido negativo, a medida que a área transversal que existe, para este escoar, diminui, o que é observado a medida que a área ocupada pela bolha, na seção transversal, aumenta. Esse efeito será mais pronunciado ao compararmos pontos com maiores distâncias do nariz da bolha alongada, a montante da mesma, como será visto nas próximas páginas. Em relação ao perfil de velocidade, é possível observar que este possui um achatamento próximo à região central do filme de líquido, principalmente para os pontos -12 e -14ms (-0,37 e -0,43D), decaindo junto à interface da bolha. Uma tendência semelhante também foi observada por Siddiqui et al. (2016), conforme exposto na Figura 4-4, e por Fonseca Junior (2010). Claramente, o perfil de velocidade a montante da bolha alongada e próximo ao nariz da mesma ainda não se encontra desenvolvido, mostrando semelhança com o perfil logo a jusante da bolha, exposto na figura 7.10.

É importante ressaltar, também, que o perfil de velocidades médio pode sofrer influência do fato de terem sido usadas regiões de filme líquido com alturas ligeiramente diferentes no cálculo do mesmo. Conforme reportado na seção 6.4.4, a região ocupada pela bolha alongada foi determinada a partir de 150 imagens, sendo utilizada a mesma máscara para todos os campos de velocidade usados para a determinação do escoamento em determinada posição, em relação ao nariz da bolha. Como a posição da bolha alongada, e conseqüentemente a altura do filme líquido é um fenômeno conhecidamente estocástico, mesmo utilizando a frente da bolha como referencial, a posição que esta ocupava na seção transversal, nas 150 imagens de região estudada, variava ligeiramente em torno de um valor médio. É possível que o perfil de velocidades, nesta região, não corresponda exatamente ao fenômeno físico. Para confirmar se a observação acima é válida, ou se este é realmente o perfil correspondente

ao fenômeno físico, é necessário obter a média a partir de campos vetoriais onde a bolha ocupe exatamente a mesma posição. Este é um dos próximos passos a serem executados, na continuação deste trabalho.

Serão apresentados, em seguida, os campo de velocidade das componentes u , v e w dos vetores de velocidade na seção transversal da tubulação. Nas figuras mostrando a componente w na seção transversal, serão apresentados também vetores representando as componentes u e v . A análise desses dados será feita após a apresentação sequencial, da figura 7.30 a 7.41.

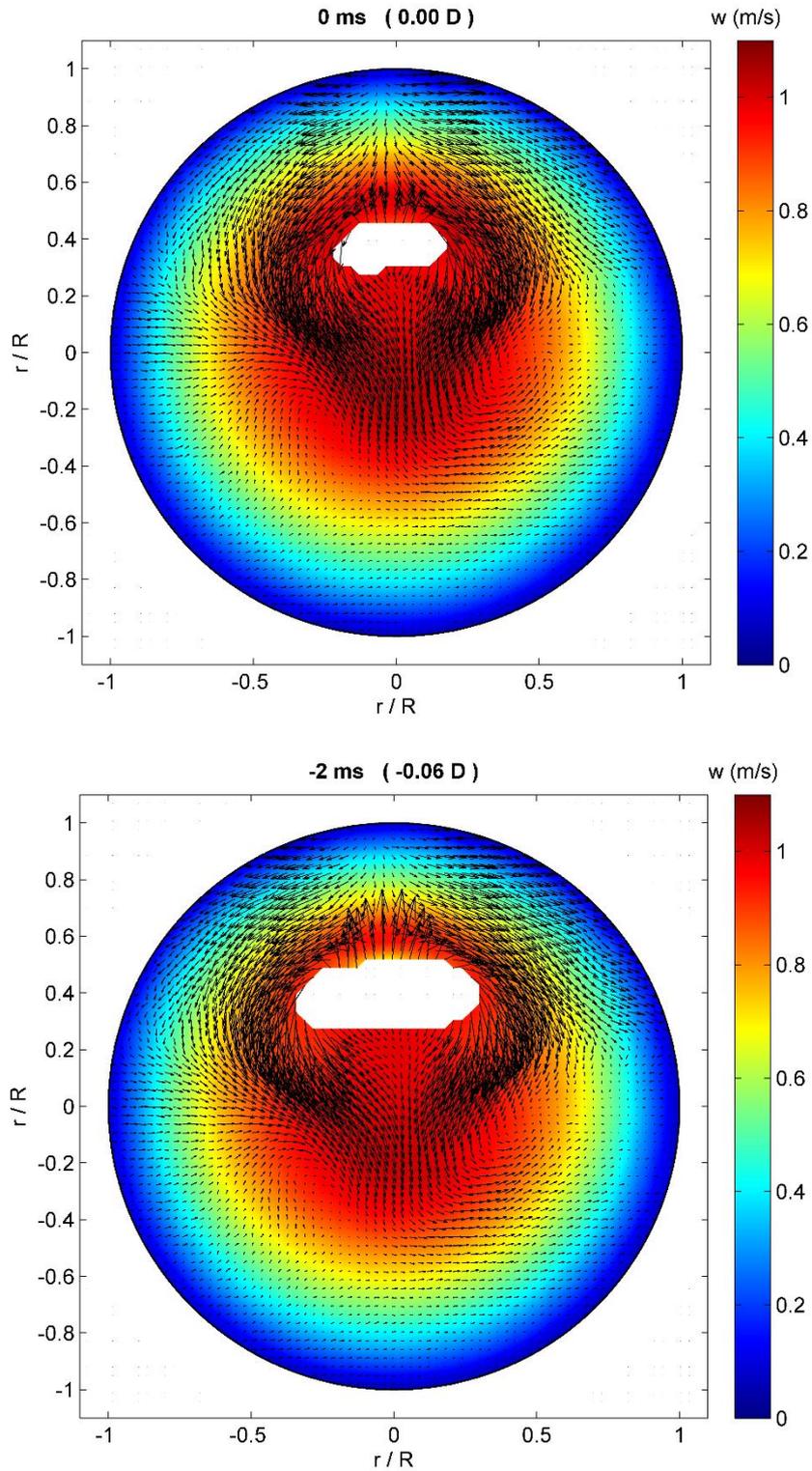


Figura 7-30 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos 0ms e -2ms, a montante da bolha alongada.

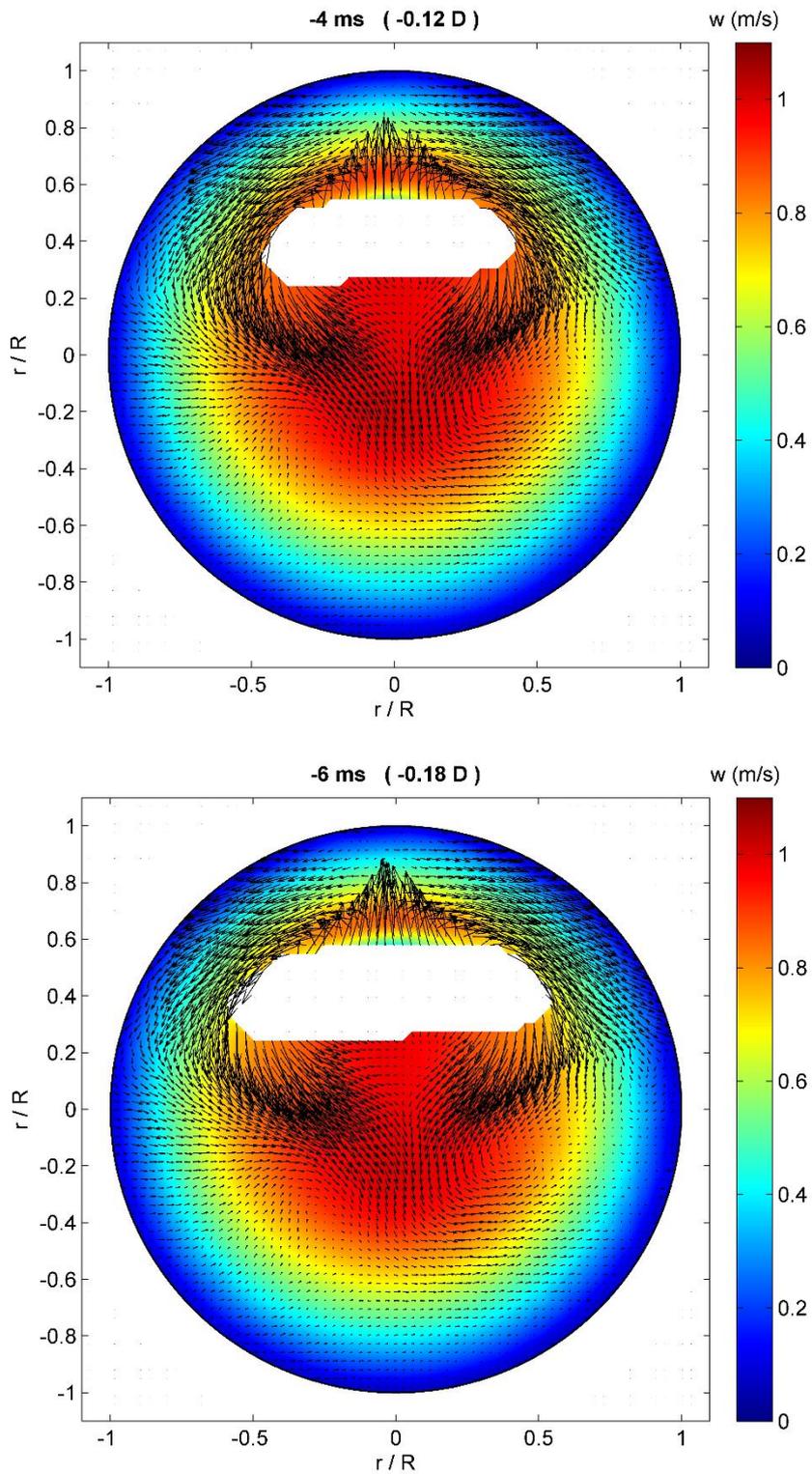


Figura 7-31 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos -4ms e -6ms, a montante da bolha alongada.

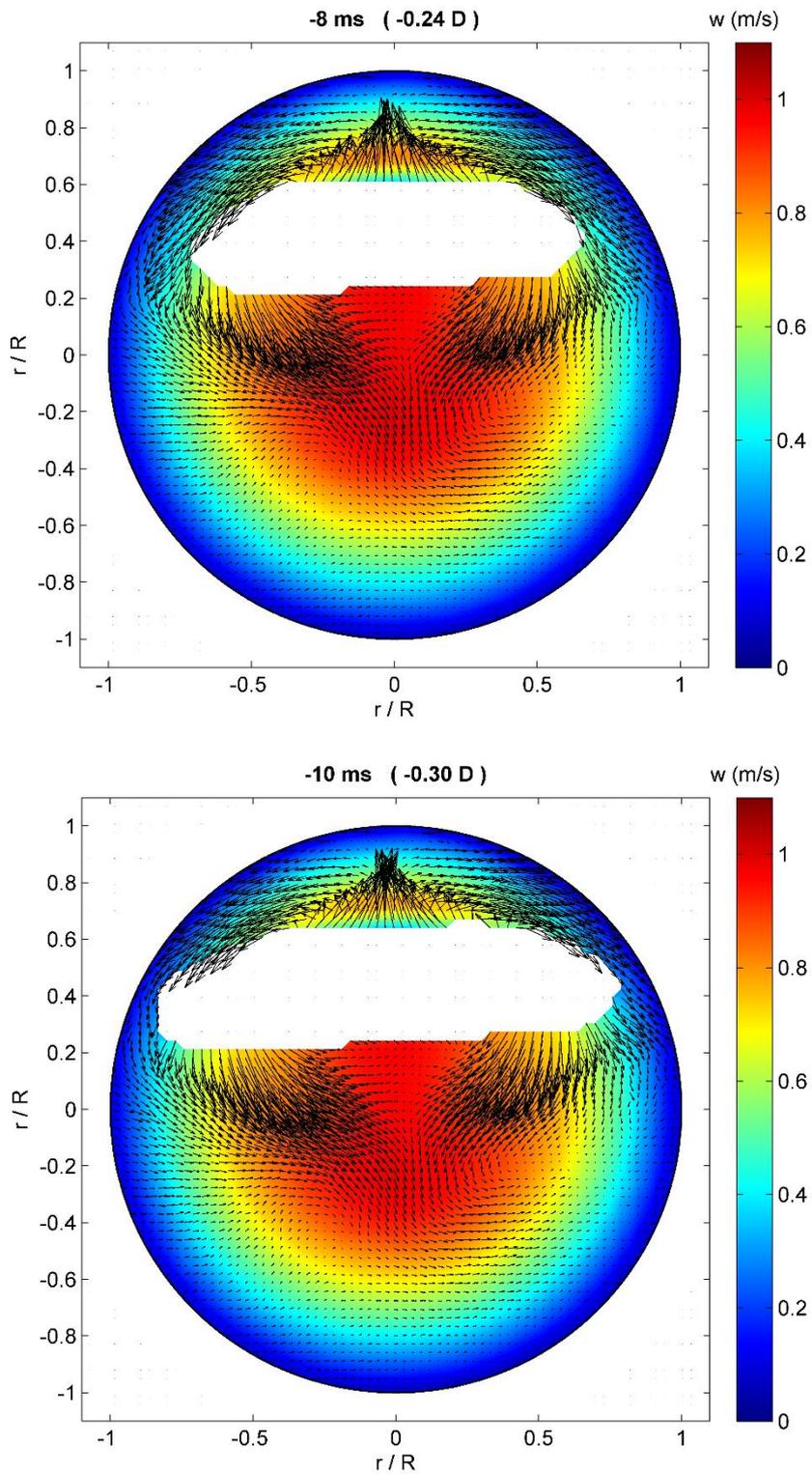


Figura 7-32 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos -8ms e -10ms, a montante da bolha alongada.

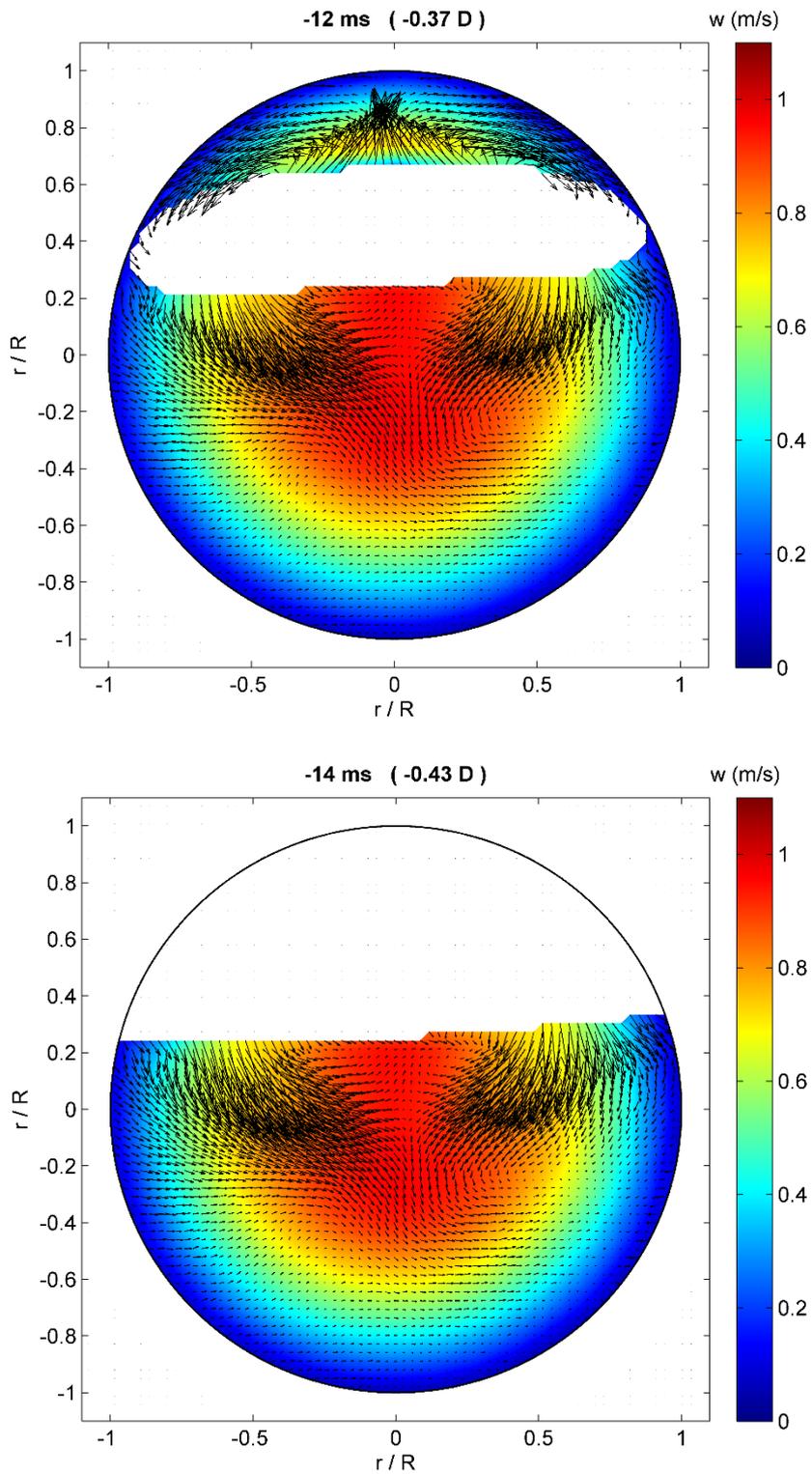


Figura 7-33 – Campos de velocidade, mostrando a componente w em cores e vetores representando as componentes u e v para os pontos -12ms e -14ms, a montante da bolha alongada.

A análise das figuras 7.30 a 7.33 mostram que entre os pontos 0 e -12ms (0 e -0,36D a montante da frente da bolha), existe um movimento relativamente simétrico em relação ao eixo vertical, de circulação do líquido ao longo da seção transversal, ao redor da bolha alongada, principalmente na parte superior da tubulação, acima do nariz da bolha. Analisando qualitativamente, um campo vetorial com a mesma tendência de movimento foi obtido por Febres et al. (2010), através de simulações numéricas no software FLUENT™, para escoamento de água e ar. Em trabalhos futuros, será feita uma comparação dos dados obtidos neste trabalho com a simulação executada por Febres et al. (2010), para fluidos com as mesmas propriedades dos fluidos aqui estudados.

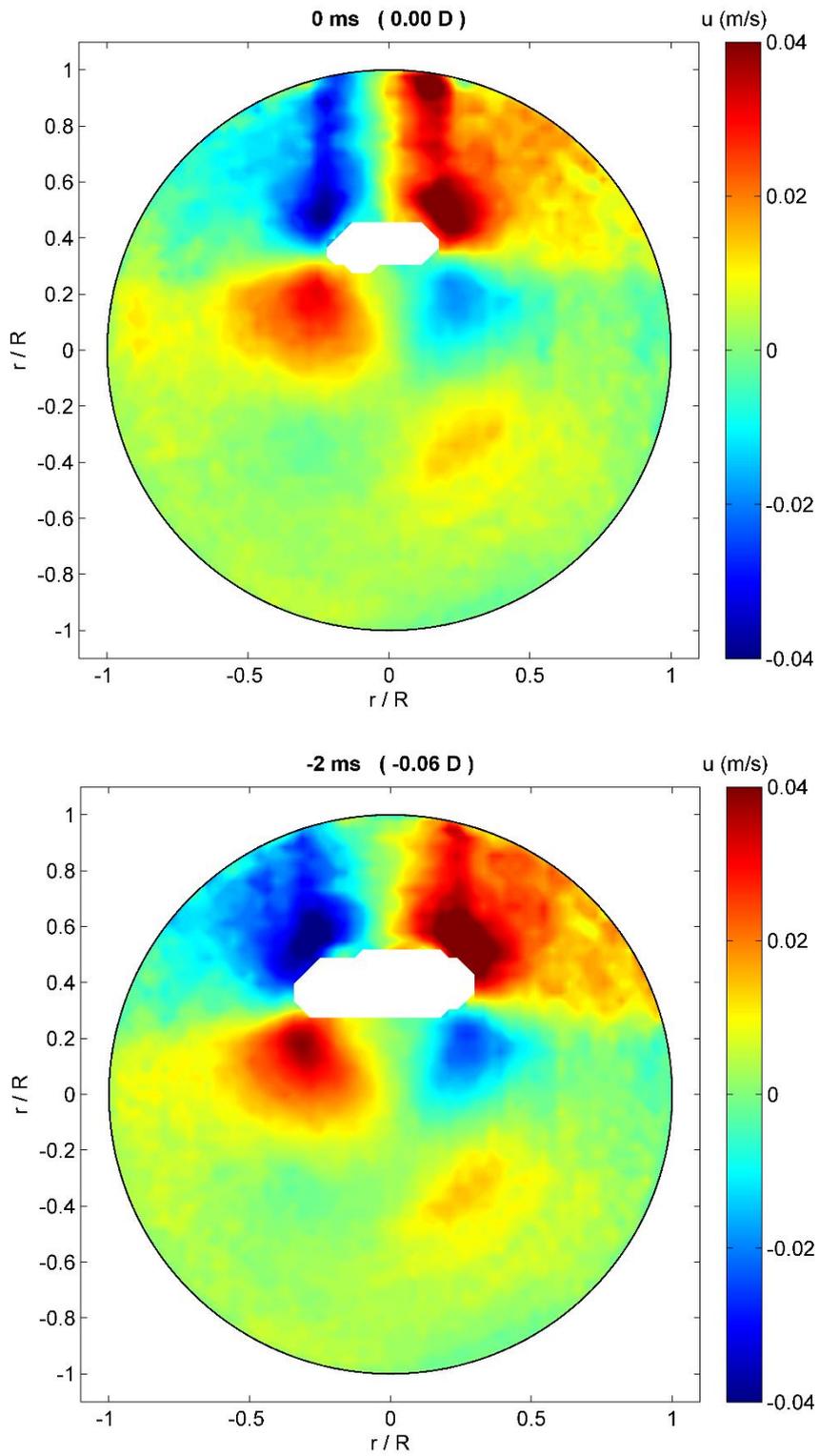


Figura 7-34 – Campos de velocidade, mostrando a componente u em cores para os pontos 0ms e -2ms, a montante da bolha alongada.

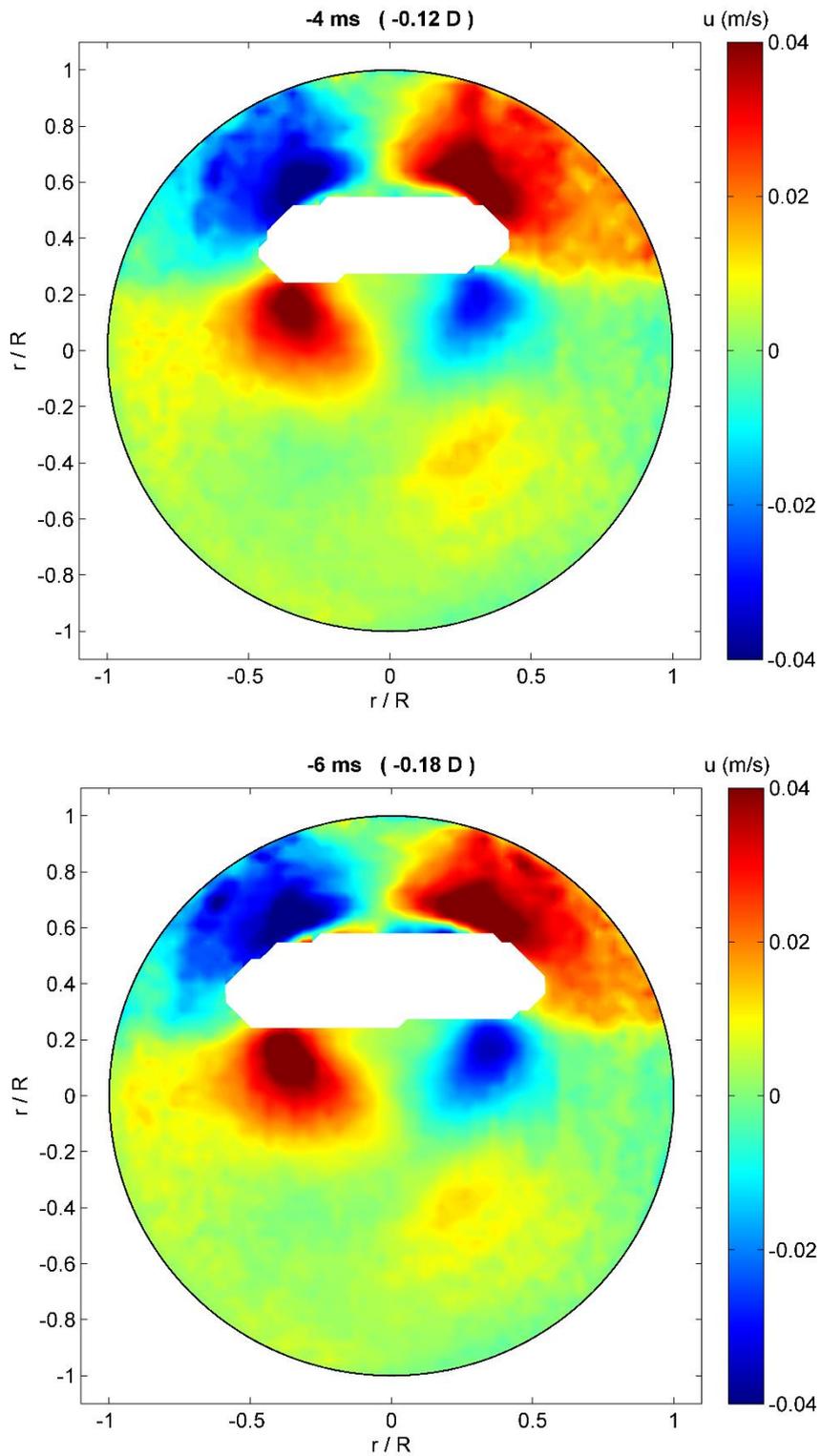


Figura 7-35 – Campos de velocidade, mostrando a componente u em cores para os pontos -4ms e -6ms, a montante da bolha alongada.

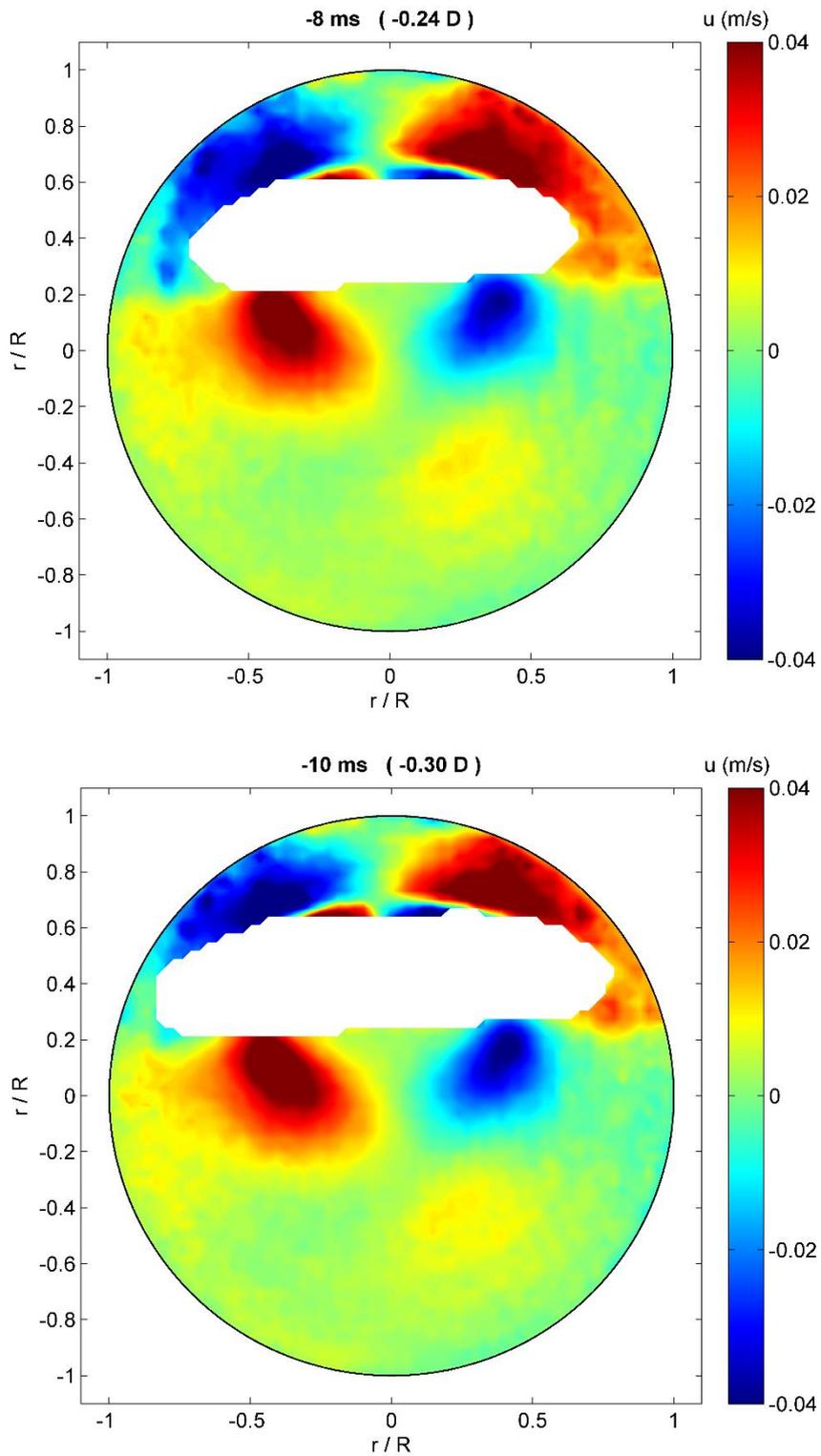


Figura 7-36 – Campos de velocidade, mostrando a componente u em cores para os pontos -8ms e -10ms, a montante da bolha alongada.

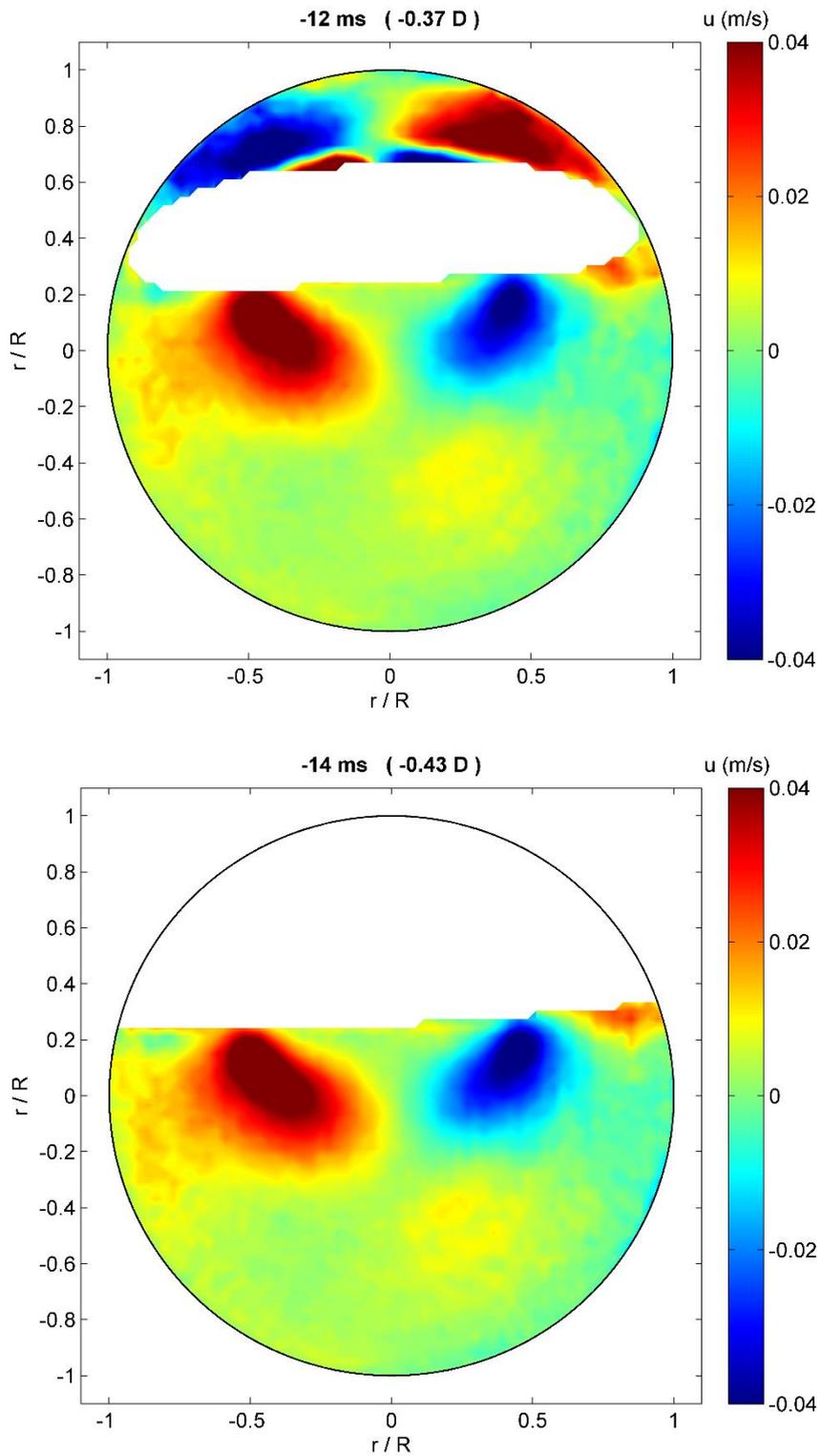


Figura 7-37 – Campos de velocidade, mostrando a componente u em cores para os pontos -12ms e -14ms, a montante da bolha alongada.

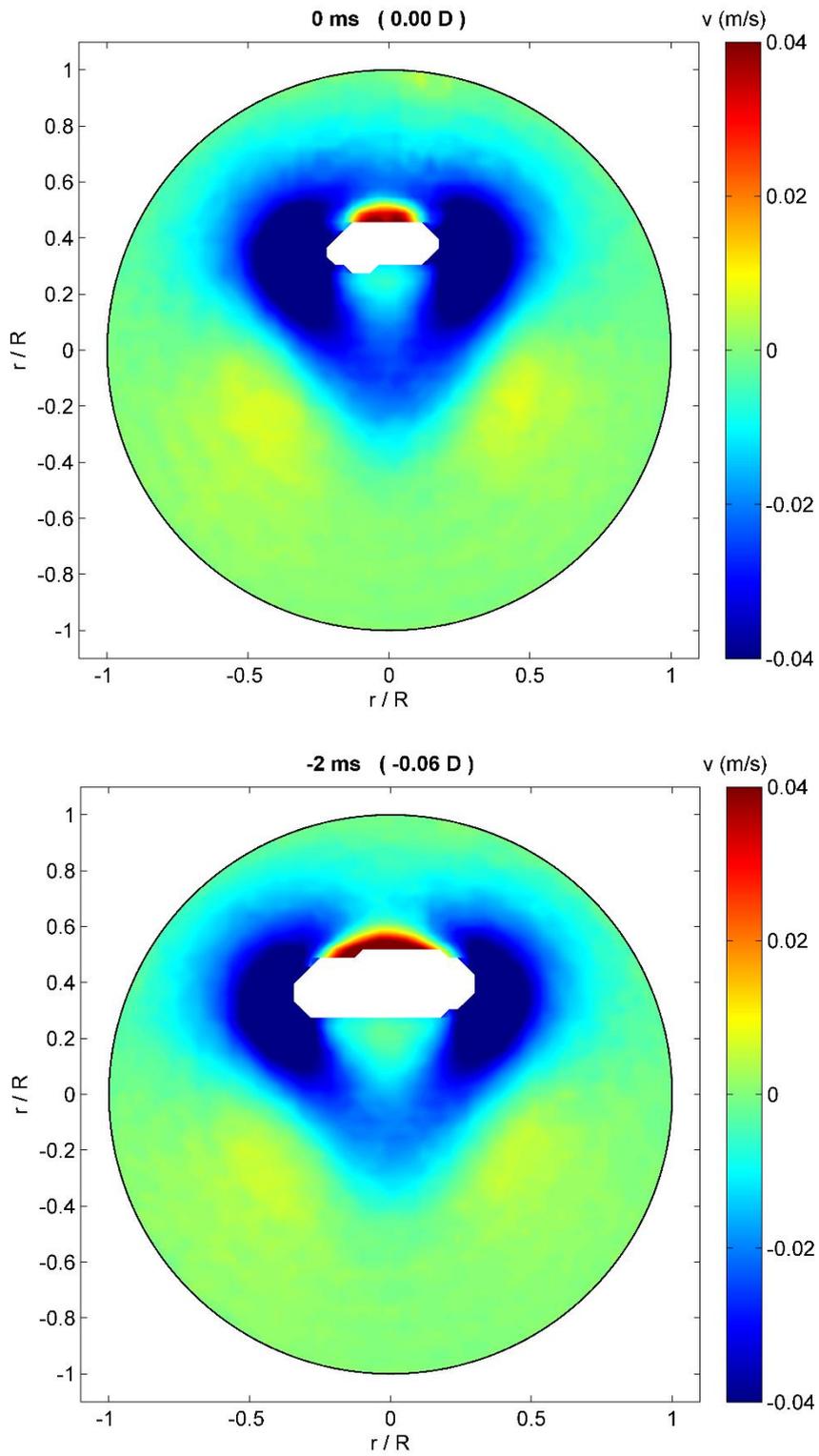


Figura 7-38 – Campos de velocidade, mostrando a componente v em cores para os pontos 0ms e -2ms, a montante da bolha alongada.

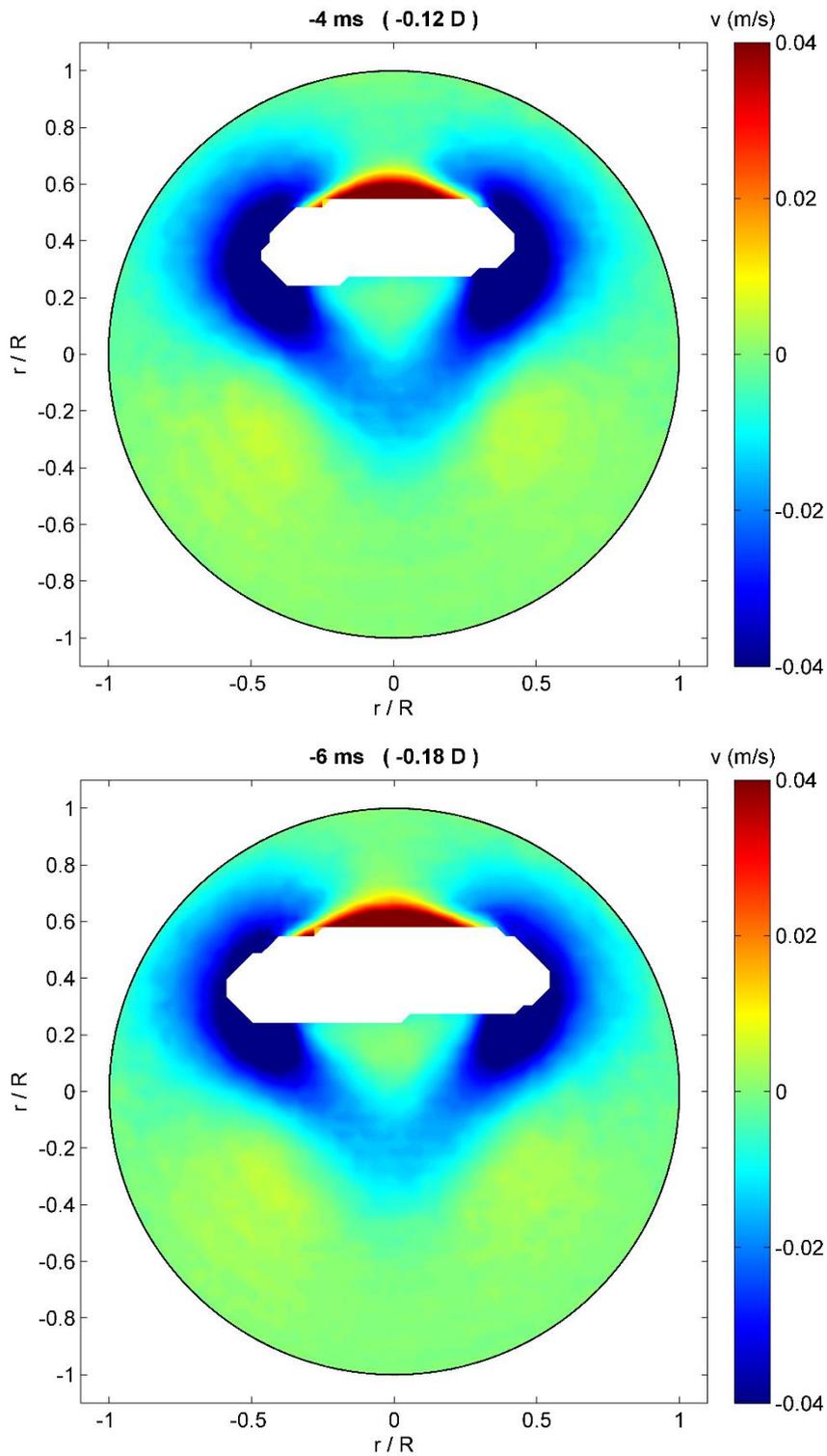


Figura 7-39 – Campos de velocidade, mostrando a componente v em cores para os pontos -4ms e -6ms , a montante da bolha alongada.

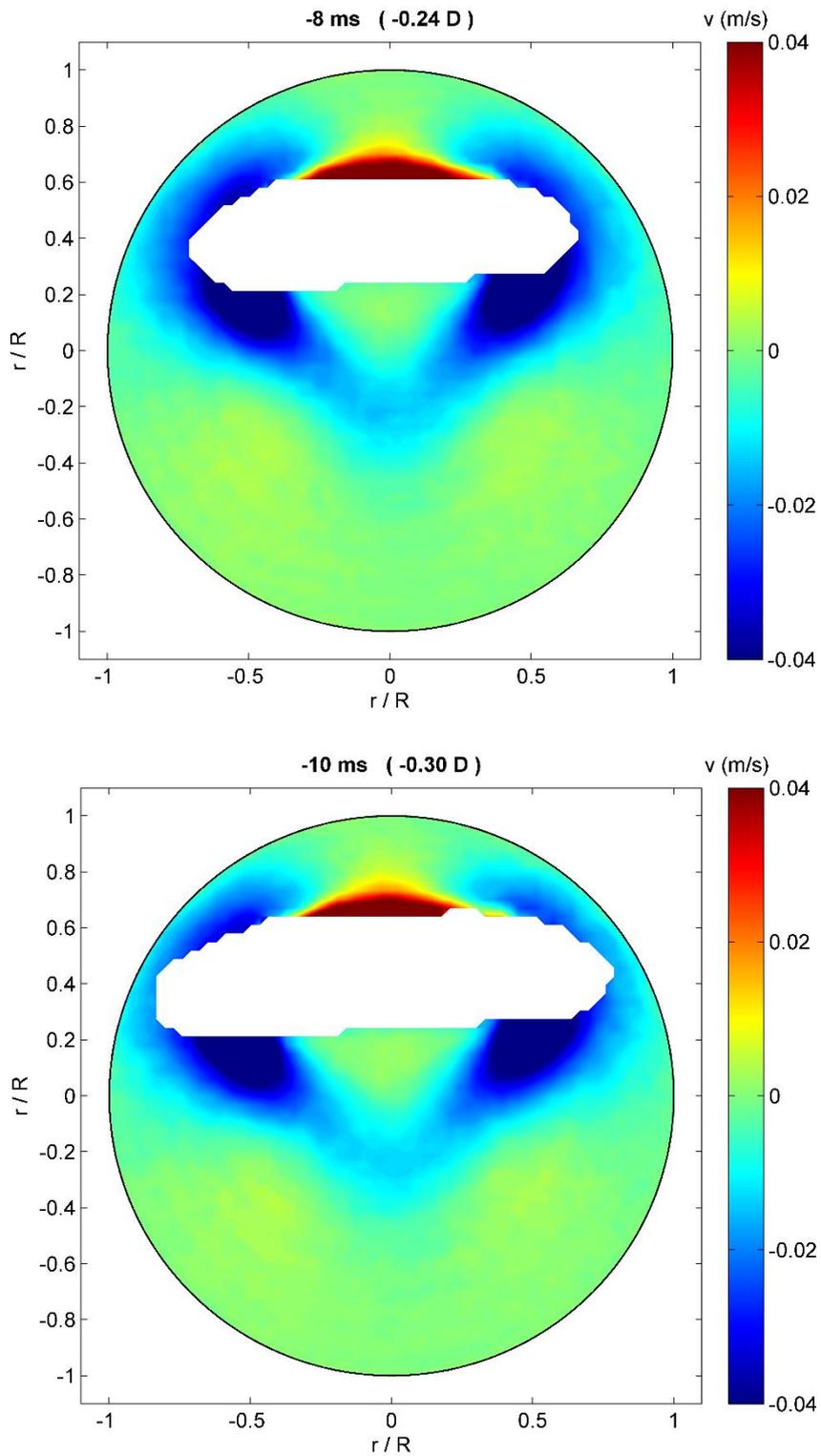


Figura 7-40 – Campos de velocidade, mostrando a componente v em cores para os pontos -8ms e -10ms, a montante da bolha alongada.

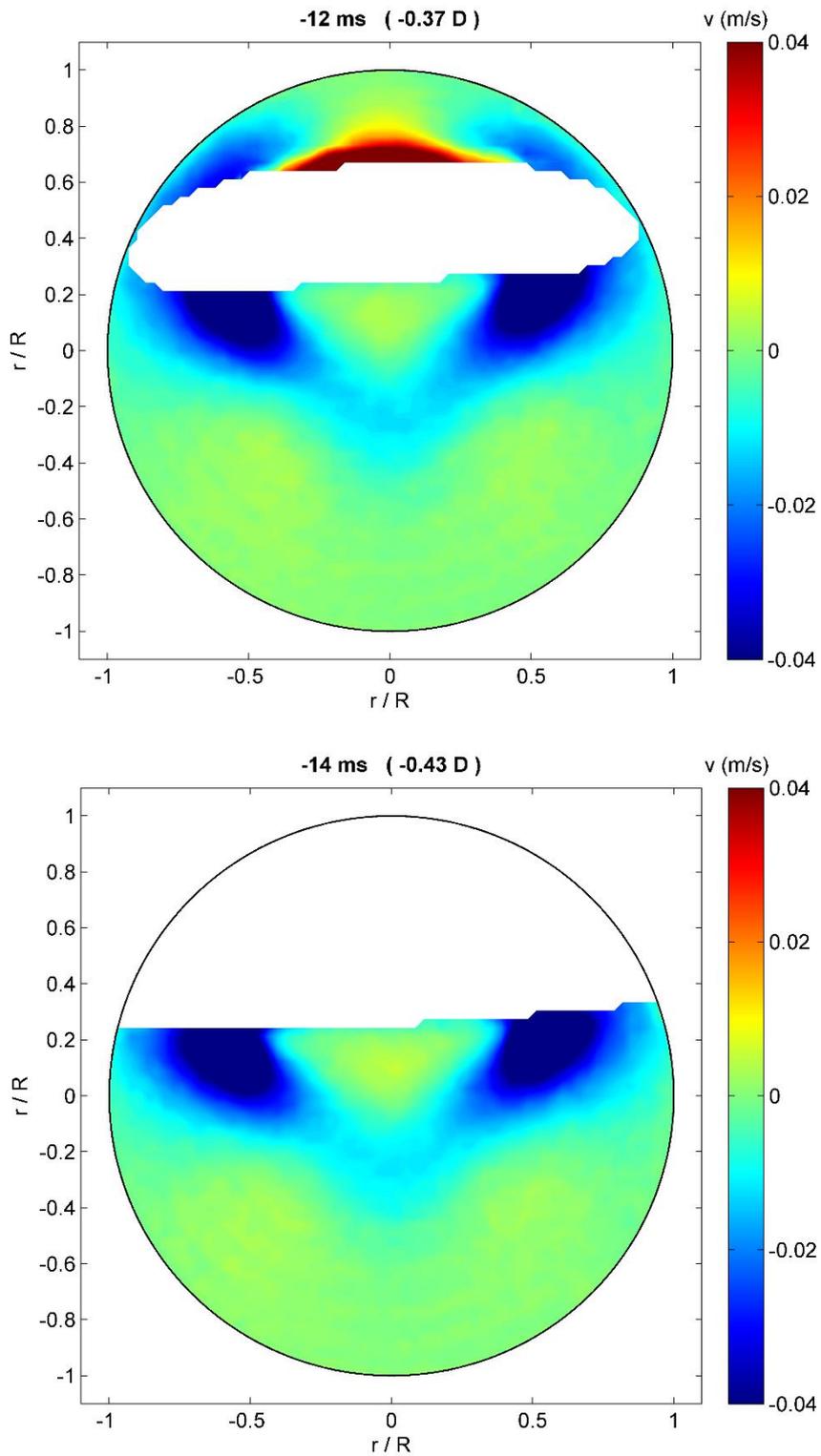


Figura 7-41 – Campos de velocidade, mostrando a componente v em cores para os pontos -12ms e -14ms, a montante da bolha alongada.

A partir da análise das componentes u e v do vetor velocidade entre os pontos 0 e -12ms (0 e -0,36D) a montante do nariz da bolha (figuras 7.34 a figura 7.37 e figura 7.38 a figura 7.41), é possível entender melhor o movimento do líquido explicado no parágrafo acima. É possível observar uma tendência de movimento ascendente na região logo acima da máscara, provavelmente causado pelo deslocamento de líquido a medida que a bolha vai ocupando esta região. Tal movimento causa um efeito cascada, deslocando o líquido da região acima da máscara na direção horizontal (figuras 7.34 a 7.37), se afastando do centro da tubulação, que desloca o líquido da região ao lado da bolha, na direção vertical e no sentido descendente (figuras 7.38 a 7.41) e, finalmente, que desloca o líquido na direção horizontal, em direção ao centro da tubulação (figuras 7.34 a 7.37). É interessante notar que na região logo abaixo da máscara, não há um movimento descendente expressivo, como ocorre na região logo acima. Tal observação indica que a região ocupada pela bolha, acima desta, cresce significativamente mais rápido que a região abaixo da mesma, refletindo uma assimetria no perfil da bolha. Esta hipótese poderá ser confirmada em trabalhos futuros, a partir da metodologia de detecção da interface da bolha, descrita na seção 6.4.4.

É importante destacar que a região de máscara nas figuras acima não corresponde à região da bolha, mas a região onde ocorre bloqueio de algum das imagens de partículas, devido ao corpo da bolha interceptar a linha de visão das câmeras, conforme descrito na seção 6.4.4. Como as máscaras são obtidas a partir das imagens do escoamento, e não do campo vetorial obtido, quando esta é aplicada ao campo vetorial, são observadas regiões com pequenos saltos, diferentemente do perfil arredondado da máscara, observado na figura 6.14. Isso ocorre pois as figuras de isocontornos são geradas a partir dos vetores obtidos, dispostos em uma malha discreta com espaçamento de 16 pixels, resolução consideravelmente inferior a das imagens de partículas.

Uma análise interessante a ser feita, é a avaliação do perfil de velocidade na direção axial, na região de filme líquido, pois diversos modelos existentes para o escoamento intermitente, consideram um escoamento hidrodinamicamente desenvolvido no pistão e no filme líquido.

A figura 7.41 mostra uma comparação entre o perfil mencionado acima para diferentes pontos da região de filme líquido.

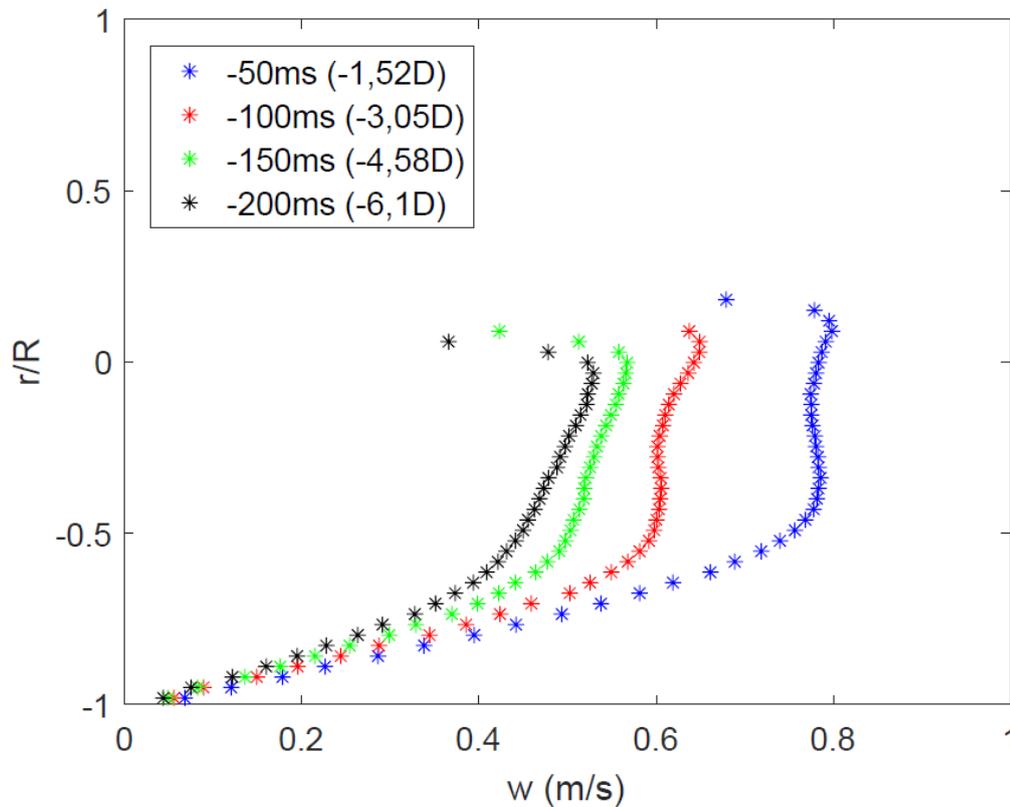


Figura 7-42 – Perfil da componente w do vetor velocidade para diferentes pontos na região de filme líquido.

É possível observar que, assim como na região próxima ao nariz da bolha, a montante do mesmo, a velocidade média da fase líquida diminui à medida que adentramos no filme líquido, de forma a manter a vazão volumétrica constante. Para todos os casos, a velocidade do líquido próximo à interface diminui, o que pode ser explicado pelo fato da tensão de cisalhamento, na região de interface, possuir o mesmo valor de amplitude, com sinal invertido, em ambas as fases. É possível observar, também, que em algum momento entre os pontos -150ms (-3,05D) e -200ms (-4,58D), o perfil de velocidade passa a ser mais bem comportado, apresentando apenas um ponto de inflexão.

A figura 7.43 mostra em maior detalhe o perfil de velocidades da componente w para pontos mais afastados do nariz da bolha, no filme líquido. É possível observar que a partir de -160ms ($-4.88D$), a tendência do perfil se mantém a mesma, com ligeira variação em amplitude, o que pode ser explicado por uma baixa variação de altura do filme líquido nesta região.

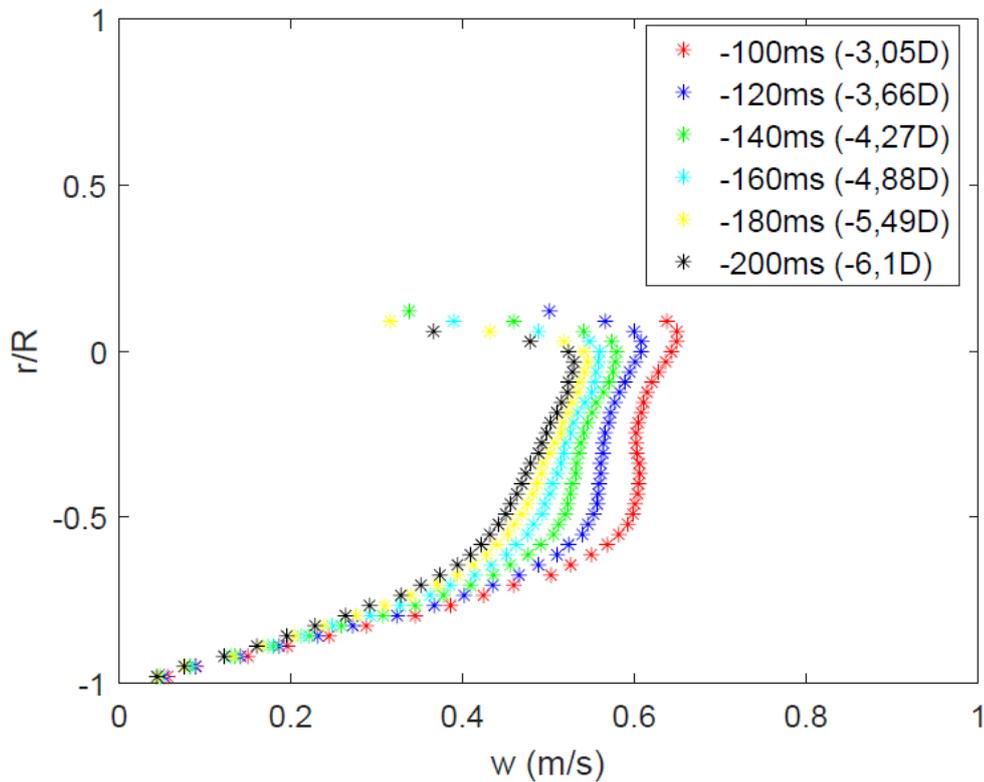


Figura 7-43 - Perfil da componente w do vetor velocidade para pontos mais afastados do nariz da bolha, na região de filme líquido.

8 Conclusão

No presente trabalho, o escoamento bifásico intermitente de gás e líquido, em duto horizontal, foi estudado. Os fluidos utilizados no escoamento bifásico foram ar, na fase gás, e uma solução de água e glicerina com viscosidade conhecida, na fase líquida. Inicialmente, foi utilizado um sistema de interruptores de feixe, para obter estatísticas do comprimento do pistão líquido e da velocidade de translação do nariz da bolha alongada. As técnicas de PIV estereoscópico e de Fluorescência Induzida por Laser foram empregadas, em sequência, para determinar as três componentes do vetor velocidade, na fase líquida, em uma seção transversal da tubulação. Foram obtidos campos vetoriais médios, das três componentes do vetor velocidade, em diversas regiões de filme líquido e de pistão líquido, em torno do nariz da bolha. Os dados obtidos são considerados inéditos na literatura.

A partir da análise dos histogramas obtidos com o auxílio do sistema de interruptores de feixe, foi possível observar que, na estação de medição, o comprimento dos pistões de líquido encontrava-se distribuído em duas regiões, indicando que os pistões não se desenvolveram completamente, e que seria necessária uma tubulação com uma relação L/D maior para que isso ocorresse. O histograma de distribuição da região com os maiores pistões seguiu uma distribuição log-normal, que, de acordo com Nydal et al. (1992) e Ujang et al. (2006), é a distribuição encontrada para o comprimento de pistões de líquido já desenvolvidos. É possível que esta região representasse, portanto, os pistões já desenvolvidos obtidos no experimento. Não foram feitas análises da velocidade de translação da traseira da bolha alongada, simultaneamente à velocidade da frente da mesma, a fim de confirmar esta hipótese. Apesar da distribuição do comprimento do pistão de líquido possuir duas regiões distintas, o mesmo não ocorreu com a distribuição da velocidade de translação do nariz da

bolha alongada. O teorema do limite central foi utilizado para obter o intervalo de confiança para a média da velocidade do nariz da bolha, sendo esta utilizada para converter o intervalo de tempo, entre as aquisições de imagens, em espaço.

Os campos vetoriais médios obtidos com a técnica de PIV estereoscópico mostraram detalhadamente a evolução das três componentes do vetor velocidade durante a passagem da frente da bolha alongada. Na região do pistão de líquido, a jusante da bolha alongada, foi possível observar que, a medida que esta se aproximava da região de avaliação, havia uma aceleração do líquido, ao longo do eixo central da tubulação, no sentido descendente, formando vórtices simétricos, de rotação contrária, que perdiam a intensidade com a chegada iminente da bolha. Ainda na região do pistão de líquido, a análise do perfil de velocidade na direção principal do escoamento, ao longo do eixo central da tubulação, mostrou que para pontos próximos ao nariz da bolha alongada, havia uma deformação significativa do perfil de velocidade, que passava a possuir dois pontos de máximo. Este fenômeno já havia sido reportado por Fonseca Junior (2010), e pode ser explicado pelo deslocamento do líquido pela bolha, que se move com uma velocidade média maior que o líquido do pistão. Apesar de existirem relatos, na literatura, de que o perfil de velocidades em regiões centrais do pistão de líquido se encontra hidrodinamicamente desenvolvido, isto não foi observado neste trabalho. Os perfis de velocidade obtidos para pontos afastados até $6,1D$ do nariz da bolha alongada, mostraram que a velocidade máxima se encontrava acima do eixo central da tubulação, e não no centro.

Os campos vetoriais médios obtidos na região do filme líquido revelaram, qualitativamente, semelhança com os dados de simulação numérica obtidos por Febres et al. (2010), com um movimento circular simétrico, ao redor da bolha alongada. A análise do perfil de velocidade, na direção principal do escoamento, mostrou que a velocidade média diminuía a medida que a distância para o nariz da bolha alongada aumentava, o que pode ser explicado pela conservação da vazão volumétrica, visto que o gás se move, conforme discutido anteriormente, com uma velocidade média maior que o líquido. Com a bolha ocupando regiões maiores da seção

transversal, a vazão volumétrica de líquido deve diminuir. É esperado que o perfil de velocidade, para diferentes posições no filme e no pistão de líquido, possa contribuir para melhorias nas equações de fechamento para o fator de atrito e para o fator de forma do perfil de velocidades, de modelos unidimensionais, pois, diversos desses modelos, consideram o perfil como hidrodinamicamente desenvolvido.

Trabalhos futuros, envolvendo o mesmo arranjo experimental de SPIV aqui utilizado, poderiam determinar os campos vetoriais médios para diferentes pontos de operação (vazões volumétricas de gás e líquido diferentes). Uma pequena modificação na estação de medição também poderia ser executada, invertendo a posição das câmeras, de forma espelhada em relação ao plano de iluminação, com o intuito de obter campos vetoriais da região de esteira da bolha alongada, utilizando a traseira da mesma como referência. Também seria interessante estudar o escoamento intermitente para diferentes viscosidades do líquido, o que pode ser obtido variando a temperatura da solução de água e glicerina. Para todos os casos, as comparações com simulações numéricas poderiam ser executadas.

9

Referências bibliográficas

Abdul-Majeed, G. H., Al-Mashat, A. M., A mechanistic model for vertical and inclined two-phase slug flow, **Journal of Petroleum Science and Engineering**. Vol. 27, pp. 59-67, 2000.

Abrantes, J. K.; Paula, I. B.; Azevedo, L. F. A. **Medição de escoamentos turbulentos utilizando velocimetria por imagem de partículas**. In: Carmo, Assi, Meneghini, Aranaha, Volpe. Turbulência. 1ed. São Paulo: ABCM USP, 2012, v. 8, p. 133-209.

Abrantes, J. K., Stanislas, M., Azevedo, L. F. A., **Holographic Particle Image Velocimetry for Wall Turbulence Measurements**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Duplo Diploma; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio, e École Centrale de Lille, EC Lille. - 2012.

Adrian, R., Dynamic ranges of velocity and spatial resolution of particle image velocimetry, **Measurement Science and Technology**, Vol. 8, pp. 1393-1398, 1997.

Adrian, R., Yao, C. S. Pulsed laser technique application to liquid and gaseous flow and the scattering power of seed materials, **Applied Optics**, Vol. 24, pp. 44-52, 1985.

Adrian, R. J., Westerweel, J., **Particle Image Velocimetry**, Cambridge University Press, 2011..

Almeida, J. A., **Sistemas de Velocimetria por Imagens de Partículas**, Tese (Doutorado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro , 1997.

Andreussi, P., Bendiksen, K., An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid pipe flow, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 15, pp. 937-975, 1989.

Baker, Ovid., Design of Pipelines for The Simultaneous Flow of Oil and Gas, **Society of Petroleum Engineers**, Dallas, 1953.

Bendiksen, K. H., Malnes, D. Nydal, O. J., On the modelling of slug flow, **Chemical Engineering Communications**, Vols. 141-142, pp. 71-102, 1996.

Bendiksen, K. H., An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 10, pp. 467-483, 1984.

Bertola, V., Slug velocity profiles in horizontal gas-liquid flow, **Experiments in Fluids**, Vol. 32, pp. 722-727, 2002.

Bonizzi, M., **Transient one-dimensional modelling of multiphase slug flows**, Imperial College, University of London. - PhD Thesis, 2003.

Brennen, C..E., **Fundamentals of Multiphase Flow**, Cambridge U.Press, 2005.

Carbone, L. C., **Simulação numérica de um misturador gás-líquido para estações de bombeio**, Dissertação de Mestrado, PUC-RIO, 2015.

Carneiro, J. N.E [et al.], Statistical Characterization of two-phase slug flow in a horizontal pipe, **Journal of the brazilian society of mechanical science and engineering**, Vol. 33, pp. 251-258, 2011.

Carpintero-Rogero, E., **Experimental investigation of transient slug-flows**, PhD Thesis, Technische Universitat Munchen, 2008.

Carpintero-Rogero, E., Kröss, B. e Sattelmayer, T., Simultaneous HS-PIV and shadowgraph measurement of gas-liquid flows in a horizontal pipe, Lisboa, Portugal : **13th Int Symp on Applications of Laser Techniques**, 2006.

Chisholm, D. A., Theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 10, pp. 1767-1778, 1967.

Cook, M., Behnia, M., Pressure drop calculation and modelling of inclined intermittent gas-liquid flow, **Chemical Engineering Science**, Vol. 55, pp. 4699-4708, 2000.

Cook, M., Behnia, M., Slug length prediction in near horizontal gas-liquid intermittent flow, **Chemical Engineering Science**, Vol. 55, pp. 2009-2018, 2000.

Coudert, S., Schon, J.P., Back projection algorithm with misalignment corrections for 2D3C Stereoscopic PIV, **Measurement Science and Technology**, Vol. 12, pp. 1371-1381, 2001.

Czapp, M. [et al.], High-speed Stereo and 2D PIV Measurements of two-phase Slug Flow in a Horizontal Pipe, Lisboa, Portugal : **16th Int Symp on Application of Laser Techniques**, 2012.

Czapp, M. [et al.], Investigations on slug flow in a horizontal pipe using stereoscopic particle image velocimetry and CFD simulation with volume of fluid method, Anaheim, California : **20th International Conference of Nuclear Engineering**, 2012.

Dukler, A. E., Hubbard, M. G., A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes, **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, 1975.

Fabre, J., Liné, A., Modeling of two-phase slug flow, **Annu. Rev. Fluid. Mech.**, Vol. 24, pp. 21-46, 1992

Fagundes, N. J. R., Bubble-Bubble Interaction in Horizontal Two-Phase Slug Flow, **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, Vol. 23, 2001.

Farsetti, S., Farisè, S., Poesio, P., Experimental investigation of high viscosity oil-air intermittent flow, **Experimental Thermal and Fluid Science**, Vol. 57, pp. 285-292, 2014.

Febres M [et al.], Three-dimensional unit slug in a horizontal pipe, Tampa, FL : 7th **International Conference on Multiphase Flow**, 2010.

Fonseca Junior, R., **Medição do Campo Instantâneo de Velocidade do Líquido no Escoamento Bifásico Intermitente em Tubos Horizontais e Inclinados**, Tese de Mestrado - PUC-RIO, 2010.

Gokcal, B., Al-Sarkhi, A. S., Sarica, C., Prediction of Slug Frequency for High-Viscosity Oils in Horizontal Pipes, **SPE Projects, Facilities & Construction**, pp. 136-144, 2010.

Goldstein, R. J., **Fluid Mechanics Measurement**, Taylor & Francis, 1996. Volume 2.

Gregory, G. A., Scott, D. S., Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow, **AIChE Journal**, Vol. 15, pp. 933-935, 1969.

Gregory, G. A., Nicholson, M. K., Aziz, K., Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 4. pp. 33-39, 1978.

Greskovich, E. J., Shrier, A. L., Slug frequency in horizontal gas-liquid slug flow, **Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop.**, Vol. 11, pp. 317-318, 1972.

Gueyffier, D. [et al.], Volume of fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three dimensional flows, **J. Comput. Phys.**, Vol. 152, pp. 423-456, 1999.

Hetsroni, G., **Handbook of Multiphase Systems**, Hemisphere Publishing Corporation, 1982.

Hua, G. [et al.], Comparison of multiphase pumping technologies for subsea and downhole applications, **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. – Denver, SPE 146783, 2011.

Hurlburt, E. T., Hanratty, T. J., Prediction of the transition from stratified to slug and plug flow for long pipes, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 28, pp. 707-729, 2002.

INMETRO, **Avaliação de Dados de Medição** - Guia Para a Expressão de Incerteza de Medição – GUM, 2008.

Issa, R. I., Kempf, M. H. W., Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 29, pp. 69-95, 2003.

Kolev, N.I., **Multiphase flow dynamics**, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.

Kvernfold, O. [et al.], Velocity Distribution in Horizontal Slug Flow, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 10. pp. 447-457, 1984.

Laurindo, W. R., **Estudo experimental de bolhas alongadas no escoamento bifásico horizontal intermitente**, Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2012.

Lin, J., **Etude détaillée des structures cohérentes de la zone tampon de la turbulence de paroi à l'aide de données de PIV stéréoscopique**, PhD Thesis, École Centrale de Lille, 2006.

Lin, P. Y., Hanratty, T. J., Detection of slug flow from pressure measurements, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 13, pp. 13-21, 1987.

Lin, P. Y., Hanratty, T. J., Prediction of the initiation of slugs with linear stability theory, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 12, pp. 79-98, 1986.

Lockhart, R. W., Martinelli, R. C., Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes, **Chemical Engineering Progress**, Vol. 45, pp. 39-48, 1949.

Mandhane, J. M., Gregory, G. A., Aziz, K. A., Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes, **Int. J. Multiphase Flow**, Vol. 1, pp. 537-553, 1974.

Martins, F. J. W. A., **Characterization of Near-Wall Turbulent Flows by Thomographic PIV**, PhD Thesis, PUC-Rio, 2016.

Montgomery, C. D., Runger, G. C., **Applied statistics and probability for engineers**, John Wiley & Sons Inc, Vol 3, 2003.

Nicholson, M. K., Gregory, G. A., Azik. K, Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models, **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Vol. 56, pp. 653-66, 1978.

Nicklin, D. J., Wilkes, J. O., Davidson, J. F., Two-phase flow in vertical tubes, **Trans. Instn. Chem. Engrs**, Vol. 40, pp. 61-68, 1962.

Nieckele, A., **O Métodos computacionais para escoamento multifásico**, Escola brasileira de escoamentos multifásicos, São Carlos, Cap 6, 2010.

Nydal, O. J., Pintus, S., Andreussi, P., Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 18, pp. 439-453, 1992.

Prasad, A. K., **Stereoscopic particle image velocimetry**, Experiments in fluids, Vol. 29, pp. 103-116, 2000.

Raffel, M. [et al.], **Particle Image Velocimetry: a practical guide**, Springer, Vol 2, 2007.

Santiago, J. G. [et al.], A Particle Image Velocimetry System for Microfluidics, **Experiment in Fluids**, Vol. 25, pp. 316-319, 1998.

Scarano, F., Tomographic piv: principles and practice, **Measurement Science and Technology**, Vol. 24, 2013.

Schmidt, Z., Brill, J. P., Beggs, H. D., Choking can eliminate severe pipeline slugging, **Oil & Gas Journal**, Vol. 12, pp. 230-238, 1980.

Sciacchitano, A. [et al.], Collaborative framework for piv uncertainty quantification: comparative assessment of methods, **Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics**. - Lisboa, Portugal, 2014.

Sharma S, Lewis S e Kojasoy G Local studies in horizontal gas-liquid slug flow, **Nuclear Engineering and Design**. - 1998. - Vol. 184. - pp. 305-318.

Shavit U, Lowe R J e Steinbuck J V Intensity Capping: a Simple Method to improve Cross-Correlation PIV Results, **Experiments in Fluids.**, Vol. 42, pp. 225-240, 2007.

Siddiqui, M. I. [et al.], Simultaneous velocity measurement and the coupling effect of the liquid and gas phases in slug flow using PIV-LIF technique, **Journal of Visualization**, Vol. 19, pp. 103-114, 2016.

Soloff, S. M., Adrian, R. J., Liu, Z. C., Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry, **Meas. Sci. Technol**, Vol. 8, pp. 1441-1454, 1997.

Soria, M. F., **Modelagem tridimensional de golfada unitária em tubulação horizontal com modelo VOF (Volume of Fluid)**, Dissertação de Mestrado. - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), 2009.

Taitel, Y. Barnea, A., A consistent approach for calculating pressure drop in inclined slug flow, **Chemical Engineering Science**, Vol. 45, pp. 1199-1206, 1990.

Taitel, Y., Barnea, D., Two-phase Slug Flow, **Advances in Heat Transfer**, Vol. 20, pp. 83-132, 1990.

Taitel, Y., Stability of Severe Slugging, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 12, pp. 203-217, 1986.

Taitel, Y., Dukler, A. E., A Model for Predicting Flow Regime Transition in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow, **AIChE Journal**, Vol. 22, pp. 47-55, 1976.

Tutkun, M. [et al.], In situ calibration of hot wires probes in turbulent flows, **Experiment in Fluids**, Vol. 46, pp. 617-629, 2009.

Ujang, P. M. [et al.], Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 32, pp. 527-552, 2006.

Van Doorne, C. W. H., Westerweel. J., Measurement of laminar, transitional and turbulent pipe flow using Stereoscopic-PIV, **Experiment in Fluids**, Vol. 42, pp. 259-279, 2007.

Wallis, G.B., **One-dimensional Two-phase Flow**, McGraw-Hill, 1969.

Wang, X., Guo, L., Zhang, X., An experimental study of the statistical parameters of gas-liquid two-phase flow in horizontal pipeline, **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 50, pp. 2439-2443, 2007.

Westerweel, J., Fundamentals of Digital Particle Image Velocimetry, **Measurement Science and Technology**, Vol. 8, pp. 1379-1392, 1997.

Woods, B. D., Hanratty, T. J., Relation of slug stability to shedding rate, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 22, pp. 809-828, 1996.

Woods, B. D., Hanratty, T. J., Relation of slug stability to shedding rate, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 22, pp. 809-828, 1996.

Woods, B. D., Fan, Z., Hanratty, T. J., Frequency and development of slugs in a horizontal pipe at large liquid flows, **International Journal of Multiphase Flow**, Vol. 32, pp. 902-925, 2006.

Zukoski, E. E., Influence of viscosity, surface tension and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes, **J. Fluid. Mech**, Vol. 25, pp. 821-237, 1966.