



Rodrigo dos Santos Navarro de Mesquita

**Medição do campo tri-dimensional de
velocidade da fase líquida de escoamentos
turbulentos, gas-líquido, intermitentes em tubo
horizontal**

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 Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro
Abril de 2019



Rodrigo dos Santos Navarro de Mesquita

**Medição do campo tri-dimensional de
velocidade da fase líquida de escoamentos
turbulentos, gas-líquido, intermitentes em tubo
horizontal**

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. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. João Neuenschwander Escosteguy Carneiro

Flowtech – ISdB

Prof. Igor Braga de Paula

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de Abril de 2019

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

Rodrigo dos Santos Navarro de Mesquita

Graduou-se em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, em julho de 2016. Atualmente participa do grupo de pesquisa do Laboratório de Engenharia de Fluidos, da PUC-Rio, com foco na área de escoamento multifásico

Ficha Catalográfica

Mesquita, Rodrigo dos Santos Navarro de

Medição do campo tri-dimensional de velocidade da fase líquida de escoamentos turbulentos, gas-líquido, intermitentes em tubo horizontal / Rodrigo dos Santos Navarro de Mesquita; orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo . – 2019.

v., 103 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2019.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses.
2. Escoamento gás-líquido;. 3. Escoamento intermitente;. 4. Campos de velocidade 3D;. 5. PIV estereoscópico.. I. Alzuguir Azevedo, Luis Fernando. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, Ricardo Navarro e Gilsilene dos Santos,
por todo apoio e amor incondicional.

Agradecimentos

Escrever os agradecimentos, antes de toda a informação técnica e científica que será apresentada, serve como uma pitada de emoção necessária. Parar e lembrar de todas as pessoas presentes na minha vida que, de alguma forma, ajudaram nesta caminhada, serve como reflexão. Afinal, a vida é um esforço conjunto dos nossos ciclos em busca de um bem estar coletivo. É evidente que, a primeira vista, esta é uma conquista individual, porém, seria uma conquista impossível de ser alcançada sem as pessoas que serão citadas.

Antes de tudo e de todos, não posso deixar de agradecer aos meus pais, Ricardo e Gilsilene, e lembrar de toda nossa caminhada ao longos dos meus quase 26 anos. Meu pai, meu herói e minha inspiração diária a seguir sempre em frente com determinação, mesmo quando parece não haver esperança. Minha mãe, que suporta tudo e serve de suporte a todos, principalmente a seu único filho. A vocês, todo meu amor e agradecimento.

Devo agradecer também a minha família. Obrigado aos meus tios, em especial meu tio Roberto que sempre me instigou e me inspirou a buscar conhecimento, meu muito obrigado. Obrigado a minha avó, Therezinha, que sempre teve muito orgulho de mim, mesmo sem saber muito bem o que faço.

Dedico este trabalho a meu avô, Hortêncio, que se foi há pouco mais de 2 anos, curioso por natureza e interessado em soluções engenhosas para problemas cotidianos e que com suas histórias me inspirou e ainda me inspira em momentos de saudade. Gostaria que estivesse aqui, para ler e ouvir o meu obrigado.

Agradeço aos meus amigos do Canal Baleia, sempre interessados, questionavam e me incentivavam durante esses anos. Estiveram sempre presentes, alguns inclusive visitando o laboratório como é o caso de Bolinha, Cleantho e Digão.

Agradeço ao meu orientador Luis Fernando, o Lu. Uma mente brilhante, engenheiro excepcional, de inteligência rara e coração mais raro ainda. Presente na minha vida desde 2013, quando comecei no laboratório de engenharia de fluidos como aluno de iniciação científica. De lá pra cá passou de chefe para, em suas próprias palavras, amigo. Obrigado por tudo que me ensinou, por orientar este trabalho e muitas vezes por orientar esta cabeça confusa.

Agradeço ao meu grande amigo e virtual co-orientador deste trabalho, Leo. Sem sua ajuda e incentivo, eu não chegaria tão longe. Obrigado pela sua amizade, pelos momentos que passamos no laboratório e fora dele e por tudo que aprendi e aprendo com você a cada dia.

Agradeço aos meus colegas e amigos que dividem o escritório do laboratório comigo. Pedro, que desde 2011 me acompanha, Bruno, Ivan e Omar. Não poderia ter companheiros melhores.

Agradeço ao pessoal do LabLu que está comigo desde 2013, época de iniciação científica. Agradecer ao Igor, que me tutelou e orientou durante a época de graduação; a Paula, companheira de trabalho por muitos anos e sempre acreditou em mim; ao Leozinho, por toda ajuda e companheirismo nas horas de laboratório; ao Fabão, pela amizade e ensinamentos; Ao Marcio e ao Alexandre, pelas resenhas, risadas e por tudo que me ensinaram na oficina do laboratório; aos alunos de iniciação Fernando, Mike, Rafaela e João, pelo excelente trabalho e ajuda que me deram durante os experimentos; ao Guilherme, Helena, Luciana, Jubs, Marcos, João e recentemente o Ricardo.

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

Resumo

Mesquita, Rodrigo dos Santos Navarro de; Alzuguir Azevedo, Luis Fernando(orientador). **Medição do campo tri-dimensional de velocidade da fase líquida de escoamentos turbulentos, gás-líquido, intermitentes em tubo horizontal**. Rio de Janeiro, 2019. 103p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O estudo do escoamento intermitente de gás e líquido é de enorme relevância. Devido a sua vasta ocorrência em diversos problemas industriais, como na indústria do petróleo, em escoamentos de água e vapor em trocadores de calor e em sistemas de refrigeração de usinas nucleares, diversos estudos experimentais e numéricos buscam obter um conhecimento mais profundo deste complexo fenômeno. Devido a esta complexidade, se fazem necessários experimentos detalhados de maneira a dar suporte aos modelos matemáticos desenvolvidos. O presente trabalho descreve um estudo experimental de um escoamento turbulento gás-líquido no regime intermitente para tubo horizontal. As técnicas de velocimetria por imagem de partícula estereoscópica de alta frequência (*SPIV*) e fluorescência induzida por laser (*LIF*) foram usadas para medir todos os três componentes do vetor de velocidade em diferentes seções do tubo, referenciadas pelo nariz da bolha de gás. A seção de testes consistiu de uma tubulação de acrílico com diâmetro interno de 40mm e 17,7m de comprimento. Os fluidos de trabalho utilizados foram água e ar, com velocidades superficiais de $j_L = 0,3, 0,4$ e $0,5m/s$ e $j_G = 0,5m/s$ que formaram o padrão de escoamento intermitente. Um sistema de sensores fotossensíveis foi utilizado para medir a velocidade de translação da bolha de gás, além de acionar o sistema *SPIV*. Desta forma, foi possível determinar os campos médios das três componentes de velocidade da fase líquida do escoamento turbulento gás-líquido em regiões de interesse na vizinhança da bolha alongada. Os dados obtidos revelaram a influência das bolhas de gás de maior velocidade, na dinâmica do campo de velocidade do líquido. Tais dados contém informações valiosas que contribuem não apenas para uma melhor compreensão da física que rege o escoamento, mas também como forma de validação e aprimoramento de modelos numéricos.

Palavras-chave

Escoamento gás-líquido; Escoamento intermitente; Campos de velocidade 3D; PIV estereoscópico.

Abstract

Mesquita, Rodrigo dos Santos Navarro de; Alzuguir Azevedo, Luis Fernando (Advisor). **Three-component liquid velocity field measurements in turbulent, gas-liquid, intermittent flows in horizontal pipes**. Rio de Janeiro, 2019. 103p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The analysis of gas-liquid intermittent flow in horizontal pipes is of great relevance importance due its applications in many industrial problems, such as in the petroleum industry, boiler and heat exchanger tubes and cooling systems of nuclear power plants. A considerable number of experimental and analytical studies have been carried out on the pursuit of a deeper knowledge of this complex phenomenon. The present work describes an experimental study of a horizontal, gas-liquid pipe flow in the intermittent regime. Experimental techniques such as high frequency stereoscopic particle image velocimetry (*SPIV*) and laser induced fluorescence (LIF), were applied in order to obtain all three components of the velocity vector at different pipe sections, referred to the gas bubble nose tip. A 40mm inner diameter, 17.7m long acrylic pipe was used as test section ($L/D \approx 450$). The working fluids, water and air formed the intermittent flow pattern, with superficial velocities of $j_L = 0.3, 0.4$ and 0.5 m/s and $j_G = 0.5$ m/s. A set of three photogate sensors, equally-spaced along the pipe, were used to measure the bubble translational velocities, and to trigger the SPIV system, allowing for the determination of ensemble-averaged, three-component velocity fields of the turbulent liquid flow in cross-stream planes around the gas bubble. The original data obtained revealed the influence of the faster-moving gas bubbles on the dynamics of the liquid velocity field, providing valuable information that contribute to a better understanding of the physics governing the flow, also serving for the validation of numerical simulations.

Keywords

Gas-liquid flow; Intermittent flow; Three-component velocity field; Stereoscopic PIV.

Sumário

Lista de Símbolos	16
1 Introdução	20
1.1 Classificação dos padrões de escoamento	20
1.2 Mapas de padrões de escoamento	22
1.3 Motivação e objetivo	25
1.4 Organização do trabalho	26
2 Técnicas experimentais	27
2.1 Introdução às técnicas experimentais	27
2.2 Velocimetria por Imagem de Partículas (<i>PIV</i>)	28
2.3 <i>PIV</i> Estereoscópico	29
2.3.1 Configurações do SPIV	30
2.3.2 Calibração e geração do vetor tridimensional	30
2.4 Fluorescência induzida por laser	31
2.5 Sistema de interruptores de feixe	32
3 Revisão Bibliográfica	34
3.1 Conceitos básicos	34
3.1.0.1 Terminologias utilizadas no escoamento intermitente	34
3.1.1 Grandezas definidas no escoamento bifásico gás-líquido	35
3.2 Velocidade de translação da bolha alongada	37
3.3 Medições de campos de velocidade na fase líquida em escoamento horizontal intermitente	39
3.3.1 Evolução da técnica experimental	39
3.3.2 Resultados relevantes	40
3.3.3 Avaliação do estado da arte	44
4 Experimento	46
4.1 Seção de testes	46
4.1.1 Descrição geral da seção de testes	46
4.1.2 Sistema de bombeamento de líquido	48
4.1.2.1 Bomba de cavidades progressivas e inversor de frequência	48
4.1.2.2 Tanque de líquido	49
4.1.3 Sistema de escoamento de ar	50
4.1.4 Caixa de visualização	51
4.1.5 Sistema de <i>PIV</i> estereoscópico	52
4.1.5.1 Câmeras	52
4.1.5.2 Sistema de iluminação	52
4.1.5.3 Sincronizador	52
4.1.5.4 Partículas	53
4.1.5.5 Filtro ótico	53
4.1.5.6 Alvo de calibração	53
4.1.6 Sistema de interruptores de feixe	55

4.2	Procedimento Experimental	55
4.2.1	Pontos de operação	55
4.2.1.1	Parâmetros para a técnica de <i>SPIV</i>	56
4.2.2	Processo de calibração	57
4.2.3	Validação da técnica	58
4.2.4	Aquisição de dados	59
4.2.4.1	Aquisição da velocidade de translação da bolha alongada	59
4.2.4.2	Aquisição e processamento das imagens	61
4.2.5	Máscara na região do filme líquido	61
5	Resultados	65
5.1	Velocidade de translação da bolha	66
5.2	Resultados de validação do escoamento monofásico	68
5.3	Resultados dos campos de velocidade para o Caso 1	69
5.3.1	Resultados para o campo de velocidade no pistão de líquido	71
5.3.2	Resultados para os campos de velocidade no filme	75
5.3.3	Apresentação conjunta dos campos de velocidade no pistão e filme de líquido	79
5.4	Reconstrução tri-dimensional do escoamento em torno da bolha	80
5.5	Perfis de velocidade no pistão e filme de líquido	82
6	Conclusão	87
A	Apêndice	92
A.1	Região de pistão de líquido	92
A.1.1	Caso 2	92
A.1.2	Caso 3	95
A.2	Região de filme de líquido	98
A.2.1	Caso 2	98
A.2.2	Caso 3	101

Lista de figuras

Figura 1.1	Desenho esquemático de alguns dos principais padrões de escoamento gás-líquido na configuração horizontal onde a fase de cor cinza denota o líquido e a branca o gás. Escoamento da esquerda para a direita. Baseado em Laurindo (2012)	21
Figura 1.2	Mapa de padrões de escoamento horizontal proposto por Spedding e Nguyen (1980)	23
Figura 1.3	Mapa proposto por Baker (1953) para escoamento bifásico horizontal	24
Figura 1.4	Mapa de padrões de escoamento gás e líquido em tubo horizontal (Mandhane et al., 1974).	25
Figura 2.1	Disposição das câmeras na configuração de rotação (Prasad, 2000)	30
Figura 2.2	Fluxograma do processo de <i>SPIV</i> utilizado	31
Figura 2.3	Funcionamento do sistema de interruptores de feixe. Adaptado de Fonseca Junior (2009)	33
Figura 3.1	Celula unitária de golfada. Adaptado de (Carpintero-Rogero, 2009)	34
Figura 3.2	Perfis de velocidade média na região de a) pistão de líquido b) filme de líquido. (Fonseca Junior, 2009)	41
Figura 3.3	Perfis de velocidade axial a jusante do nariz da bolha. (Febres et al., 2010). Comparação com dados experimentais de Fonseca Junior (2009)	42
Figura 3.4	Campo de velocidade na seção transversal para uma distância de $0.4D$ a jusante do nariz da bolha. Adaptado de (Febres et al., 2010)	43
Figura 3.5	Componentes médios de velocidade u e v , representados por vetores, e componente axial w em escala de cores para posição a montante do nariz da bolha alongada. (Fernandes et al., 2018).	44
Figura 4.1	Desenho tridimensional da seção de testes.	47
Figura 4.2	Desenho esquemático da seção de testes.	47
Figura 4.3	Curva de operação da bomba de cavidades progressivas utilizada.	49
Figura 4.4	Tanque de capacidade $300L$ utilizado para armazenamento de líquido e separação de fases durante o experimento.	50
Figura 4.5	Foto da caixa montada na seção de testes, com o alvo de calibração em seu interior (Fernandes, 2017).	51
Figura 4.6	Alvo utilizado para a calibração da técnica <i>SPIV</i> .	54
Figura 4.7	Aparato desenvolvido por Fernandes (2017) para posicionar o alvo de calibração na região de medição. Adaptado de (Fernandes et al., 2018)	54

Figura 4.8	Sistema de interruptores de feixe.	55
Figura 4.9	Identificação dos pontos de medição no mapa de padrões de escoamento de Mandhane et al. (1974)	56
Figura 4.10	Correção da malha ao longo das direções X e Y .	59
Figura 4.11	Desenho esquemático do sistema de interruptores de feixe. Adaptado de Laurindo (2012)	60
Figura 4.12	a) Diferentes posições da bolha de gás para diferentes células e em uma mesma posição relativa ao nariz da bolha; b) Procedimento manual de detecção de borda; c) Máscara instantânea gerada	63
Figura 4.13	Máscara final gerada para o processamento de imagens na região do filme líquido	64
Figura 5.1	Referencial adotado na apresentação dos resultados	66
Figura 5.2	Histograma de velocidade de translação do nariz da bolha a) Caso 1 ($j_L = 0,3$ (m/s) e $j_G = 0,5$ (m/s); b) Caso 2 ($j_L = 0,4$ (m/s) e $j_G = 0,5$ (m/s); c) Caso 3 ($j_L = 0,5$ (m/s) e $j_G = 0,5$ (m/s))	67
Figura 5.3	Comparação entre medidas de velocidade de translação da bolha de gás e a expressão apresentada por Hurlburt e Hanratty (2002)	68
Figura 5.4	Comparação entre o perfil médio de velocidade medido e o perfil teórico para escoamento laminar hidrodinamicamente desenvolvido	69
Figura 5.5	Representação esquemática da localização dos planos de medição de campos de velocidade em relação à posição do nariz da bolha para o Caso 1: a) -20 ms ($-0,56D$), b) $-12,5$ ms ($-0,35D$), c) $-7,5$ ms ($-0,21D$), d) $-2,5$ ms ($-0,07D$), e) $+2,5$ ms ($+0,07D$), f) $+7,5$ ms ($+0,21D$), g) $+12,5$ ms ($+0,35D$) e h) $+20$ ms ($+0,56D$)	71
Figura 5.6	Campos de velocidade na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3$ m/s) e $j_G = 0,5$ m/s). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.	72
Figura 5.7	Campos de velocidade horizontal, u , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3$ m/s e $j_G = 0,5$ m/s).	73
Figura 5.8	Campos de velocidade vertical, v , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3$ m/s e $j_G = 0,5$ m/s).	74
Figura 5.9	Campos de velocidade na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3$ m/s) e $j_G = 0,5$ m/s). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.	76
Figura 5.10	Campos de velocidade horizontal, u , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3$ m/s e $j_G = 0,5$ m/s).	77

- Figura 5.11 Campos de velocidade vertical, v , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). 78
- Figura 5.12 Componentes médios de velocidade u e v em diferentes posições em relação ao nariz da bolha alongada : **a)** $-12,5 ms (-0,35D)$, **b)** $-7,5 ms (-0,21D)$, **c)** $-2,5 ms (-0,07D)$, **d)** $+2,5 ms (+0,07D)$, **e)** $+12,5 ms (+0,35D)$, **f)** $+20 ms (+0,56D)$ 80
- Figura 5.13 Reconstrução tri-dimensional do escoamento ao redor do nariz da bolha para as condições de operação do Caso 1. A Iso-superfície amarela representa a máscara em torno da bolha alongada. Componente axial da velocidade, w , representada por cores nos planos transversais. A Iso-superfície azul representa região onde a componente média vertical da velocidade do líquido, v , tem valor $-0,05 m/s$. 82
- Figura 5.14 Perfil de velocidade em diferentes posições na direção axial 84
- Figura 5.15 Perfil de velocidade em diferentes posições na direção axial 85
- Figura 5.16 Perfil de velocidade em diferentes posições na direção axial 85
- Figura 5.17 Perfil de velocidade em posições afastadas do nariz da bolha 86
- Figura A.1 Campos de velocidade na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores. 92
- Figura A.2 Campos de velocidade horizontal, u , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). 93
- Figura A.3 Campos de velocidade vertical, v , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). 94
- Figura A.4 Campos de velocidade na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores. 95
- Figura A.5 Campos de velocidade horizontal, u , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). 96
- Figura A.6 Campos de velocidade vertical, v , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). 97
- Figura A.7 Campos de velocidade na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$) e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores. 98
- Figura A.8 Campos de velocidade horizontal, u , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). 99

Figura A.9 Campos de velocidade vertical, v , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$).	100
Figura A.10 Campos de velocidade na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$) e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.	101
Figura A.11 Campos de velocidade horizontal, u , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$).	102
Figura A.12 Campos de velocidade vertical, v , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$).	103

Lista de tabelas

Tabela 4.1	Pontos de operação	56
Tabela 4.2	Diâmetro das partículas na imagem para diferentes aberturas da câmera	57
Tabela 5.1	Número de Froude e medidas de velocidade de translação da bolha de gás	68

Lista de Símbolos

Letras Gregas

α	Ângulo entre o plano da imagem e o plano da lente (<i>radiano</i>)
α_G	Fração de vazio,ou seja, relação entre volume ocupado pelo gás e volume total (<i>adimensional</i>)
α_L	<i>Hold-up</i> de líquido,ou seja, relação entre volume ocupado pelo líquido e volume total (<i>adimensional</i>)
δ_z	Profundidade de foco (<i>m</i>)
λ	Comprimento de onda (<i>m</i>)
μ	Viscosidade (<i>Pa.s</i>)
ρ	Densidade (<i>kg/m³</i>)
θ	Ângulo entre plano da lente e o plano do objeto (<i>radiano</i>)

Letras latinas

A	Área da seção transversal (<i>m²</i>)
A_G	Área da seção transversal ocupada pelo gás (<i>m²</i>)
A_L	Área da seção transversal ocupada pelo líquido (<i>m²</i>)
c	Velocidade da luz no vácuo (<i>m/s</i>)
C_o	Constante (<i>adimensional</i>)
D	Diâmetro da tubulação (<i>m</i>)
d_{im}^*	Diâmetro da partícula na imagem (<i>pixel</i>)
dp	Diâmetro das partículas (<i>m</i>)
E	Energia do fóton (<i>J</i>)
$f\#$	Abertura da lente da câmera (<i>adimensional</i>)
Fr	Número de Froude(<i>adimensional</i>)
h	Constante de Planck (<i>J.s</i>)
h_f	Altura do filme líquido (<i>m</i>)
j_G	Velocidade superficial de gás (<i>m/s</i>)

j_L	Velocidade superficial de líquido (m/s)
j_m	Velocidade superficial da mistura (m/s)
L_f	Comprimento na região de filme líquido, ou comprimento da bolha (m)
L_S	Comprimento da região de pistão de líquido (m)
L_u	Comprimento da célula unitária, igual a soma de L_f e L_s (m)
Q	Vazão volumétrica (m^3/s)
Re	Número de Reynolds (<i>adimensional</i>)
u_B	Velocidade média das bolhas dispersas no pistão de líquido (m/s)
u_b	Velocidade da frente da bolha (nariz da bolha)(m/s)
u_d	Velocidade de deslizamento (m/s)
u_{Gf}	Velocidade média da fase de gás na região do filme líquido (m/s)
u_{Lf}	Velocidade média da fase líquida na região do filme líquido (m/s)
u_{LS}	Velocidade média da fase líquida na região do pistão (m/s)
u_t	Velocidade da traseira da bolha (ou frente do pistão de líquido)(m/s)

Subscritos

B	Bolha dispersa
f	Região filme líquido
G	Fase gás
i	Interface
L	Fase líquido
m	Mistura
p	Partícula
S	Região do pistão de líquido
w	Parede (<i>wall</i>)

Lista de Abreviaturas

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*

Nunca é soft.

Lady Zeita, Primeira lei.

1

Introdução

A análise do escoamento bifásico gás-líquido, tido como um dos mais comuns e complexos, é de grande relevância. Este escoamento ocorre em inúmeras aplicações de interesse da engenharia, como em escoamento de água e vapor em trocadores de calor, na produção e transporte de petróleo, em sistemas de refrigeração de usinas nucleares, dentre outras.

Quando o escoamento gás-líquido ocorre em tubulações, as fases podem se dispor geometricamente em diferentes padrões, tais como: estratificado, bolhas dispersas, entre outros. Ao longo dos anos, foram desenvolvidos mapas para relacionar os diferentes padrões de escoamento observados com as propriedades dos fluidos, características do escoamento (como velocidade das fases) e aspectos geométricos da tubulação (como diâmetro interno e inclinação). Estes mapas são largamente utilizados em projetos de engenharia e pesquisa que envolvam escoamento gás-líquido, pois os diferentes comportamentos de cada regime estão associados a diferentes modelos para perda de carga, troca de calor massa, etc.

Desenvolver modelos matemáticos mais representativos dos fenômenos físicos envolvendo o escoamento multifásico, assim como obter um conhecimento detalhado de cada padrão de escoamento, são atividades constantes da comunidade científica. O presente trabalho tem como objetivo fornecer informações experimentais originais sobre o escoamento intermitente de gás e líquido em tubo horizontal que auxiliem no desenvolvimento e validação de modelos mais precisos para estes escoamentos.

1.1

Classificação dos padrões de escoamento

O estudo do escoamento multifásico tem entre suas principais dificuldades a dependência direta da forma da superfície da interface das fases nas taxas de transferência de quantidade de movimento, massa e calor. Especificamente para o escoamento gás-líquido, tal área varia de maneira significativa para os diferentes padrões de escoamento existentes. Há uma interdependência entre a geometria das fases e o tipo de escoamento. Logo, construir modelos de engenharia que permitam prever o comportamento dos diferentes padrões de

escoamento com uma relação adequada entre precisão e simplicidade ainda é um enorme desafio.

Classificar as diferentes configurações geométricas das fases líquido e gás em padrões de escoamento facilita o estudo de escoamentos multifásicos. No entanto, não existe um consenso entre os autores sobre o número de padrões e quais os limites entre eles. Enquanto alguns autores buscam simplificar e diminuir o número de classificações, outros buscam um maior nível de detalhe. Wallis (1969), por exemplo, utiliza definições baseadas em subdivisões e na forma do escoamento para classificar as regiões de transição entre os diferentes padrões.

A Figura 1.1 apresenta de forma ilustrativa alguns dos principais padrões de escoamento gás-líquido na configuração horizontal. Tais padrões têm definições semelhantes no escoamento vertical e inclinado. No caso horizontal, a presença da gravidade é um fator complicador adicional, pois esta tende a estratificar as fases, causando uma assimetria axial no escoamento. Em Hetsroni (1982), é possível encontrar maiores detalhes e discussões sobre os padrões de escoamento. Neste trabalho, apenas uma breve descrição é apresentada a seguir.

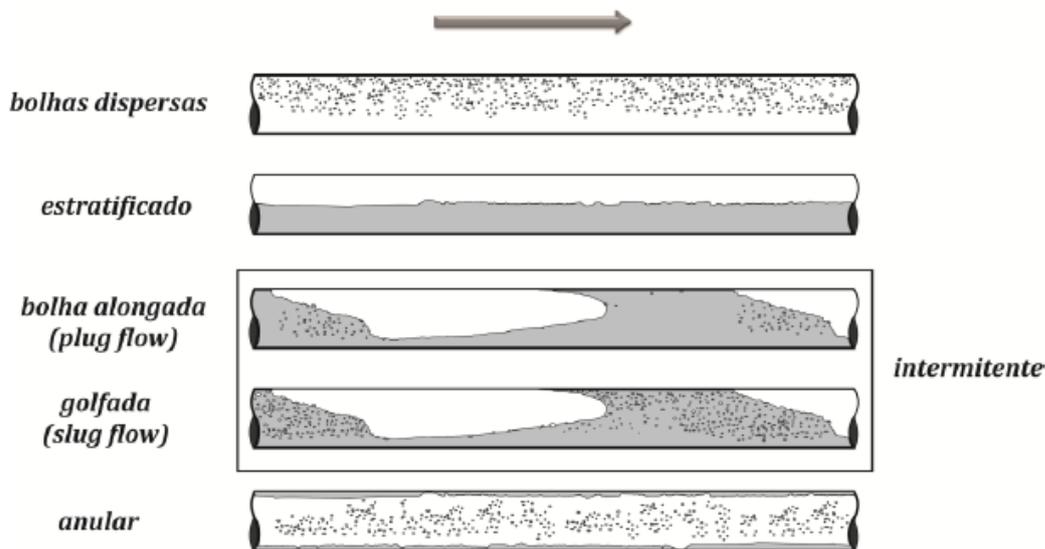


Figura 1.1: Desenho esquemático de alguns dos principais padrões de escoamento gás-líquido na configuração horizontal onde a fase de cor cinza denota o líquido e a branca o gás. Escoamento da esquerda para a direita. Baseado em Laurindo (2012)

- Escoamento em Bolhas Dispersas (*Bubbly Flow*)

Padrão de escoamento no qual a fase líquida, em alta vazão, domina a maior área da tubulação, enquanto bolhas de gás ocupam, de maneira dispersa, a parte superior, devido sua menor densidade.

- Escoamento Estratificado (*Stratified Flow*)

O escoamento estratificado tem como característica a total separação entre as fases, onde a fase líquida, mais densa, escoam abaixo da fase gasosa. Conforme a velocidade do gás aumenta, formam-se perturbações na interface gás-líquido, originando o padrão "Escoamento Ondulado-Estratificado" (*Stratified-Wavy Flow ou Wavy Flow*).

- Escoamento Intermitente (*Intermittent Flow*)

Caracterizado pela alternância das fases líquida e gasosa na forma de pistões de líquido e bolhas de gás com filme líquido. O escoamento intermitente é subdividido em duas categorias "Escoamento em Bolha Alongada" (*Elongated Bubble Flow ou Plug Flow*), para vazões de gás mais baixas, e "Escoamento em Golfada" (*Slug Flow*). A principal diferença entre eles, além da magnitude das vazões de gás, se encontra no pistão de líquido aerado característico do escoamento em golfada.

- Escoamento Anular (*Annular Flow*)

O escoamento anular ocorre para altas vazões de gás, que escoam na região central da tubulação, enquanto o líquido se encontra nas regiões próximas a parede. Em tubulações horizontais, o filme líquido é mais espesso na parte inferior, devido a ação da gravidade.

1.2

Mapas de padrões de escoamento

A maioria das investigações para escoamento vertical e horizontal, em dutos, busca determinar a dependência do padrão das fases com alguns parâmetros do escoamento, como, fluxos volumétricos (j_G, j_L), frações volumétricas (α_G, α_L) e propriedades dos fluidos (massa específica, viscosidade e tensão superficial). Os resultados geralmente são mostrados em *mapas de arranjo de fases* que determinam qual dos diferentes padrões ocorrem para determinadas condições.

Dentre os diferentes modos de se construir os mapas, existem aqueles que utilizam variáveis adimensionais. A utilização deste tipo de mapa possibilita uma aplicação mais geral, pois este não é diretamente associado à propriedades

físicas dos fluidos ou ao diâmetro da tubulação. Normalmente empregam-se adimensionais como o número de *Reynolds*, *Froude*, e a razão entre as vazões das fases. Entretanto, é preciso ressaltar que a determinação dos números adimensionais que regem cada padrão de escoamento multifásico não é uma tarefa simples. A Figura 1.2 ilustra o mapa de padrão de escoamento baseado em números adimensionais proposto por Spedding e Nguyen (1980).

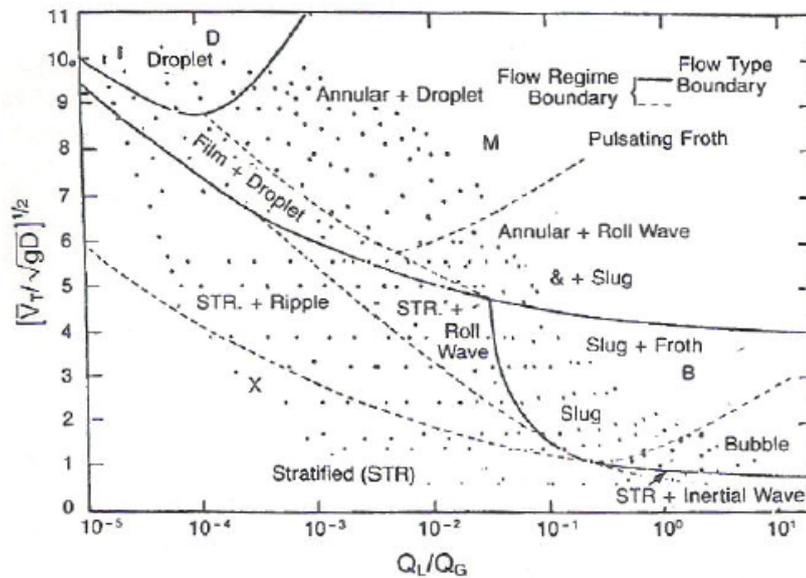


Figura 1.2: Mapa de padrões de escoamento horizontal proposto por Spedding e Nguyen (1980)

Mapas de padrão podem também ser organizados a partir de variáveis dimensionais junto com variáveis adimensionais. Um exemplo deste caso é o mapa proposto por Baker (1953), considerado pioneiro na área. Ao estudar a queda de pressão em escoamento bifásico, Baker (1953) percebeu que a configuração das fases no escoamento deve ser levada em consideração no desenvolvimento de modelos para perda de carga na tubulação. O mapa proposto encontra-se na Figura 1.3. Os termos Ψ e λ são fatores de correção usados de forma que seja possível utilizar o mapa para diferentes fluidos. Os termos G e L são fluxos de massa da fase de gás e líquido, respectivamente.

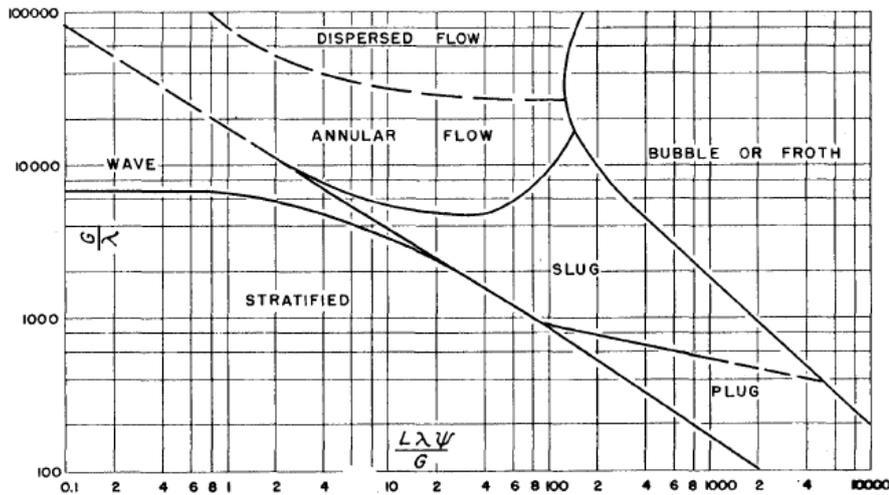


Figura 1.3: Mapa proposto por Baker (1953) para escoamento bifásico horizontal

Dentre os mapas dimensionais, um dos que constitui grande interesse industrial, devido à sua fácil implementação, é o de Mandhane et al. (1974). Este mapa é apresentado na Figura 1.4. O mapa é apresentado em termos das velocidades superficiais das fases, que definem as regiões onde prevalecem os diferentes padrões de escoamento.

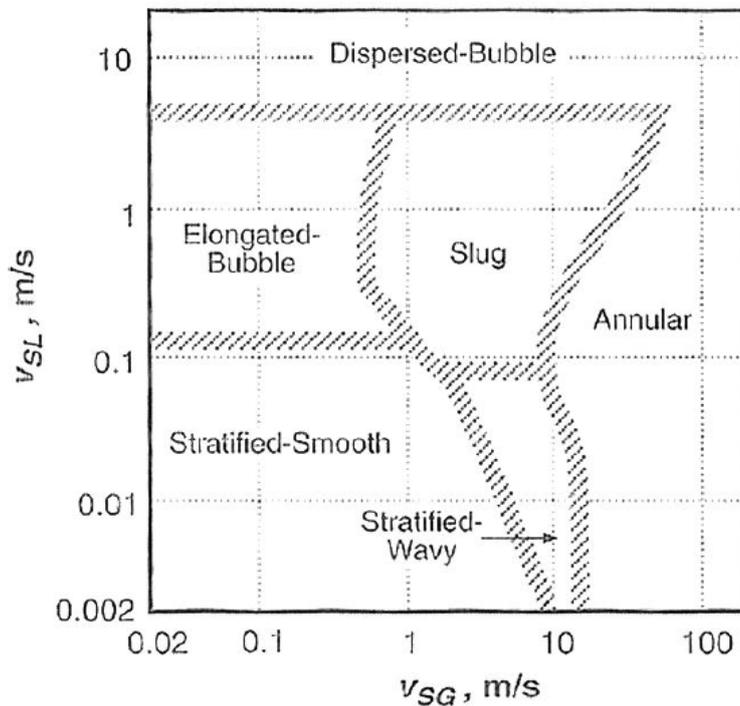


Figura 1.4: Mapa de padrões de escoamento gás e líquido em tubo horizontal (Mandhane et al., 1974).

1.3

Motivação e objetivo

Além de ser de difícil previsão, devido a alternância das fases gás e líquido, o escoamento intermitente pode causar sérios problemas em equipamentos a jusante da tubulação, além de causar danos estruturais a linhas de transporte de fluido. Desta forma, estudos têm sido realizados com o objetivo de entender a física que governa este fenômeno para que seja possível prever seu comportamento através de modelos matemáticos.

Neste trabalho, foi feito um estudo fundamental do campo de velocidades em um escoamento intermitente turbulento através da medição dos três componentes do vetor velocidade, em seções transversais da tubulação a partir da técnica de velocimetria por imagem de partícula estereoscópica (SPIV), que será descrita no capítulo 2. Estudos com medições do campo médio dos três componentes do vetor velocidade, na fase líquida, em escoamentos intermitentes turbulentos, ainda não estão disponíveis na literatura, conferindo um caráter original ao presente trabalho. Os dados aqui apresentados podem ser usados para contribuir para um melhor entendimento do comportamento

de escoamentos gás-líquido intermitentes, assim como no desenvolvimento de modelos reduzidos unidimensionais e para validação de modelos de CFD tridimensionais.

Este trabalho dá continuidade a uma linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida no Laboratório de Engenharia de Fluidos, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, iniciada por Roberto Fonseca Junior (Fonseca Junior, 2009), com o estudo do escoamento intermitente a partir da técnica de *PIV* longitudinal. Leonardo Soares Fernandes (Fernandes, 2017), deu continuidade ao trabalho utilizando, também, a técnica de *SPIV*, produzindo medições dos três componentes do vetor velocidade para escoamentos intermitentes onde a fase líquida encontrava-se no regime laminar.

1.4

Organização do trabalho

Esta dissertação está organizada em *seis* capítulos. O capítulo 2 apresenta as técnicas experimentais empregadas, focando principalmente na técnica de velocimetria por imagem de partícula estereoscópica e fluorescência induzida por laser.

No capítulo 3 é apresentada uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos disponíveis na literatura relacionados com o escoamento intermitente horizontal de gás e líquido.

O capítulo 4 descreve a seção de testes utilizada no experimento, assim como os equipamentos necessários para a implementação da técnica *SPIV*. Além disso, descreve os procedimentos experimentais empregados na caracterização do escoamento e medição dos campos de velocidade. Estes procedimentos incluem, dentre outros, a calibração, validação do método com o caso monofásico e metodologia de criação de máscaras para a região do filme líquido, necessárias para o processamento digital de imagens e obtenção dos campos de velocidade.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos para os campos dos três componentes da velocidade medidos nas regiões do pistão e filme de líquido.

O capítulo 6, apresenta as conclusões do trabalho, bem como as propostas para estudos futuros.

2

Técnicas experimentais

Este capítulo é dedicado à descrição das técnicas experimentais empregadas nos experimentos do presente trabalho, cujos resultados serão apresentados no capítulo 5. O leitor já familiarizado com as técnicas de PIV estereoscópico, fluorescência induzida por laser e sistema de interruptores pode pular este capítulo, seguindo para o capítulo 3.

2.1

Introdução às técnicas experimentais

Determinar o campo de velocidades em um escoamento é fundamental para compreender a física que governa o fenômeno de interesse. Campos de pressão, tensão de cisalhamento e diversas grandezas turbulentas podem ser determinadas a partir do conhecimento de como os vetores velocidade se distribuem no espaço e no tempo. Tais informações podem ser utilizadas, também na validação e melhoria de modelagem matemáticas usadas nas mais diversas aplicações.

As sondas pontuais, como anemômetro de fio/filme quente e anemômetro de laser-Doppler (Goldstein, 1996), são as técnicas mais tradicionais de medição de velocidade. Estas técnicas oferecem excelente níveis de incerteza experimental e alta taxa de aquisição, não sendo, no entanto, capazes de determinar campos de velocidades instantâneos em regiões extensas do escoamento.

Como o objetivo principal deste trabalho é medir os campos médios dos três componentes do vetor velocidade na fase líquida do escoamento bifásico, as técnicas de medição pontuais não são aplicáveis. Uma alternativa são as técnicas de medição óptica de campo completo, tais como: *Particle Tracking Velocimetry (PTV)*, *Laser Speckle Velocimetry (LSV)* e *Particle Image Velocimetry (PIV)*. Nessas técnicas, os vetores velocidade são determinados a partir da medição do deslocamento de pequenas partículas traçadoras, adicionadas ao escoamento. Dentre estas, a técnica mais versátil é a Velocimetria por Imagem de Partículas, ou *PIV*, da sigla em inglês. Para esta técnica, o vetor velocidade é determinado a partir do deslocamento de um padrão formado por diversas partículas, e não de cada partícula individual (como na técnica de *PTV*) ou de *speckles* gerados por essas partículas (como na técnica de *LSV*).

Segundo Raffel et al. (2007), com as informações do campo instantâneo de velocidades, é possível obter grandezas de interesse, como aquelas obtidas de derivadas espaciais da velocidade. Desta forma, grandezas importantes, tais como o vetor vorticidade e componentes do tensor taxa de deformação, podem ser determinadas.

Devido às vantagens listadas, a técnica de *PIV* em sua versão estereoscópica (*SPIV*), foi selecionada para as medições dos três componentes da velocidade. A técnica de *PIV* tradicional (ou *PIV* longitudinal) já foi bastante explorada na literatura (Raffel et al. (2007), Adrian e Westerweel (2011), Abrantes et al. (2012)). Por esta razão, será feita aqui apenas uma sucinta revisão da mesma.

O presente trabalho dá continuidade a o trabalho realizado por Fernandes et al. (2018), que utilizou a técnica *SPIV* aplicada em configuração de escoamento semelhante à do presente trabalho. Mais detalhes sobre esta técnica podem ser obtidos naquela referência. Desta forma, neste capítulo será descrita a técnica de Fluorescência Induzida por Laser - *LIF* (*Laser Induced Fluorescence*), que justifica a utilização das partículas fluorescentes, fundamentais para a técnica de *PIV* em escoamento gás-líquido. Ao final é descrito o funcionamento do sistema de interruptores de feixe utilizado para obter informações estatísticas do escoamento e sincronizar as medições de velocidade com a passagem das bolhas.

2.2

Velocimetria por Imagem de Partículas (*PIV*)

A técnica de *PIV* pode ser definida como uma técnica de medição ótica, não intrusiva, que em sua versão bidimensional, um plano de luz pulsado, normalmente produzido por uma fonte de laser, ilumina o escoamento contendo partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido. Câmeras digitais sincronizadas aos pulsos do laser capturam imagens consecutivas das partículas. As imagens são divididas em pequenas regiões denominadas janelas de interrogação. O deslocamento de padrões de partículas, contidos nas janelas de interrogação, entre as imagens, é determinado por técnicas de correlação cruzada. Como o intervalo de tempo é conhecido, os deslocamentos em cada janela de interrogação podem ser transformados em vetores velocidade. Para a aplicação desta técnica, são necessários sistemas de iluminação, aquisição de imagens e sincronização:

– Sistema de Iluminação

Formado por uma fonte de geração de luz e um conjunto de lentes, este sistema tem como função gerar um plano de luz de espessura bem

definida, correspondente a região de avaliação do escoamento. Segundo Raffel et al. (2007), um laser é usualmente utilizado como fonte de geração de luz, dada a sua capacidade de gerar luz monocromática em intervalos de tempos bem definidos e com alta energia.

– Sistema de Aquisição de Imagens

O sistema de aquisição de imagem é composto por uma ou mais câmeras, dependendo da técnica de *PIV* utilizada. São utilizadas câmeras digitais com sensores do tipo *CCD* (*Charge-Coupled Device*), ou *CMOS* (*Complementary metal-oxide semiconductor*). Estes sensores são formados por diversos elementos denominados pixels (*picture element*), que funcionam com base no efeito fotoelétrico. A luz incidente é convertida em elétrons, que são, então, transferidos para uma região de armazenamento. Este tempo de transferência é o que determina a frequência de operação de uma câmera, enquanto a máxima resolução espacial da técnica é limitada pelo número de pixels presentes no sensor.

– Sistema de Sincronização

O sistema de sincronização é composto por um sincronizador, que conectado a um computador, envia comandos para o laser e a câmera (ou câmeras) de forma a garantir o sincronismo entre o disparo do laser com a abertura da câmera, em intervalos de tempo pré-determinados.

A devida utilização da técnica de *PIV* pressupõe etapas de pré-processamento e pós-processamento, além da etapa de processamento em si, onde é feita a correlação cruzada. Descrições mais detalhadas podem ser encontradas em Abrantes et al. (2012) e Raffel et al. (2007).

2.3

***PIV* Estereoscópico**

A técnica de *PIV* Estereoscópico (ou *Stereo-PIV*, *SPIV*) tem como diferencial, em relação à técnica convencional planar, a capacidade de medir os três componentes do vetor velocidade em um plano. Esta técnica é classificada como 3C -2D (3 componentes em um plano 2D), enquanto a técnica longitudinal é classificada como 2C-2D.

O funcionamento da técnica *PIV* estereoscópica é baseado na aquisição simultânea de dois pares de imagens (duas imagens por câmera), que são combinadas matematicamente de modo a gerar os três componentes do vetor velocidade. Para tal, é necessário conhecer os deslocamentos Δx , Δy e Δz dos grupos de partículas nas janelas de interrogação. Se apenas uma única imagem

fosse capturada por cada câmera, somente duas equações seriam geradas, o que impossibilitaria a solução de um sistema de três incógnitas. A segunda imagem insere mais duas equações no sistema, possibilitando sua resolução e a reconstrução tridimensional (Prasad, 2000).

2.3.1 Configurações do SPIV

Para a utilização da técnica do *PIV* estereoscópica, as câmeras devem estar sempre posicionadas de modo a captar duas imagens do mesmo ponto do escoamento por diferentes perspectivas. Prasad (2000) classifica as possíveis montagens como sendo um sistema de translação ou de rotação. Seguindo o procedimento adotado por Fernandes et al. (2018), foi utilizado, no presente trabalho, o sistema de rotação, devido à sua melhor exatidão.

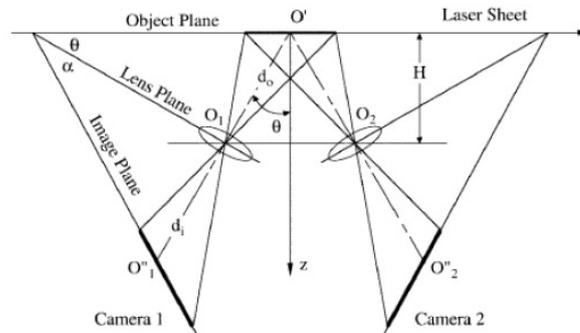


Figura 2.1: Disposição das câmeras na configuração de rotação (Prasad, 2000)

Na configuração de rotação as câmeras não estão paralelas entre si, e os planos da imagem, do objeto e da lente devem se interceptar em um mesmo ponto. Desta forma, o critério de Scheimpflug será satisfeito. A satisfação deste critério garante que toda a imagem estará em foco. Logo, deve existir um ângulo α entre o plano da imagem e o da lente. O ângulo θ representa, o ângulo entre o plano da lente e o plano do objeto, como ilustrado na Figura 2.1.

Para mais detalhes sobre as possíveis configurações da técnica de *SPIV*, é recomendada a leitura do trabalho de Fernandes (2017).

2.3.2 Calibração e geração do vetor tridimensional

Devido ao posicionamento do plano da imagem e do objeto não serem paralelos na configuração adotada, a magnificação (relação entre tamanho real

do objeto e tamanho registrado na imagem) não é constante ao longo da imagem. Logo, a imagem é distorcida em relação ao plano de medição.

Para corrigir este problema foi escolhida, para o presente trabalho, a metodologia baseada na calibração 3D, que tem como vantagem o fato de não requerer o conhecimento detalhado do caminho ótico do sistema. Esta metodologia consiste em inserir na região de medição um alvo com diversos pontos com espaçamentos conhecidos, capturando suas imagens em ao menos 2 planos distintos, com espaçamento conhecido. Desta forma, é possível gerar uma função de mapeamento capaz de distorcer a imagem e reconstruir os três componentes do vetor velocidade (Soloff et al., 1997).

Após o processo de calibração, é possível iniciar as medições. Neste trabalho, a metodologia utilizada para processar as imagens de *PIV* foi distorcer a imagem para o plano da medição, através da função de mapeamento, e então utilizar a técnica de correlação cruzada para cada par de imagens. Na etapa final, chamada de reconstrução, o inverso da função de mapeamento determina os deslocamentos Δx , Δy e Δz . Uma análise detalhada desta e outras etapas do processo de medição pode ser encontrada no trabalho de Fernandes (2017). Com os deslocamentos determinados a técnica está completa, visto que o intervalo de tempo é conhecido e os campos de velocidade podem ser obtidos. A Figura 2.2 ilustra as etapas a serem executadas para *SPIV*.

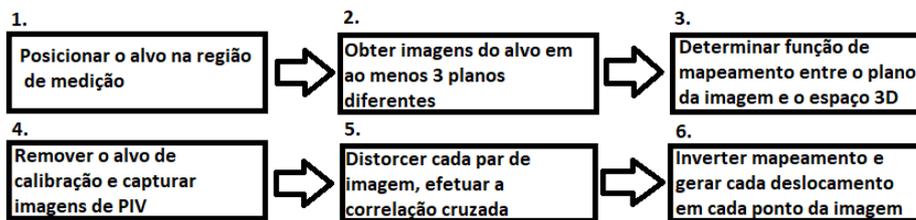


Figura 2.2: Fluxograma do processo de *SPIV* utilizado

Neste trabalho, o software Insight 4GTM foi utilizado para a calibração e processamento das imagens

2.4 Fluorescência induzida por laser

Desde o trabalho de Lindken e Merzkirch (2002), é comum a aplicação de partículas fluorescentes no estudo de escoamentos bifásicos com a técnica de *PIV*. Nesses escoamentos, a interface entre as fases é uma fonte de reflexão

de luz, podendo não só impossibilitar a correlação cruzada em regiões perto da interface como danificar o sensor da câmera. Faz-se necessário, portanto, o uso de filtros óticos, entre a câmera e o plano de medição, que deixem passar somente a radiação acima de um certo comprimento de onda. Desta maneira, não há reflexão da luz do laser e apenas as partículas são visualizadas na imagem. Esta técnica já foi utilizada com sucesso em escoamentos intermitentes gás-líquido por Fonseca Junior (2009) e Fernandes et al. (2018).

A Fluorescência Induzida por Laser (*Laser Induced Fluorescence*, LIF), se baseia no fato de que algumas substâncias, quando expostas a radiações eletromagnéticas em um dado comprimento de onda, possuem a capacidade de emitir radiação em outro comprimento de onda. Neste fenômeno, elétrons absorvem energia e migram de um estado fundamental para um estado excitado, denominado singleto. Esta energia absorvida pelo elétron é dissipada na forma de radiação eletromagnética quando este volta para o estado fundamental.

O processo de absorção e emissão ocasiona, porém, uma pequena 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 seja levemente maior. A equação 2-1 explica essa diferença no comprimento de onda. Nesta, E é a energia do fóton, h a constante de Planck, c a velocidade da luz no vácuo e λ o comprimento de onda.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (2-1)$$

O fenômeno de fluorescência ocorre apenas enquanto há energia sendo fornecida. Devido a velocidade com que as transições de estado do elétron ocorrem, a utilização de partículas traçadoras feitas de materiais fluorescentes é viável.

2.5

Sistema de interruptores de feixe

O sistema de interruptores de feixe, ou *photogates* foi empregado com sucesso nos trabalhos de Carpintero-Rogero (2009), Fonseca Junior (2009), Laurindo (2012) e Fernandes et al. (2018). Esse sistema foi utilizado, neste trabalho, para medir a velocidade de translação da bolha alongada e sincronizar o início da aquisição de dados pelo sistema de *SPIV*. Os *photogates* são constituídos de um emissor e um receptor de um feixe de luz infravermelha, posicionados de forma a ficarem em lados opostos da tubulação. Seu funcionamento é baseado na diferença de índice de refração da radiação eletromagnética entre os meios pelos quais o feixe se propaga (acrílico, água e ar). Desta ma-

neira, o feixe infravermelho somente chega ao receptor quando há somente ar em seu caminho (dentro da tubulação de acrílico). Quando a tubulação é totalmente preenchida com líquido, como na região de pistão de líquido, o feixe é desviado e não há leitura de sinal a ser realizada. A Figura 2.3 ilustra o funcionamento desses emissores. Mais detalhes podem ser encontrados no trabalho de Laurindo (2012).

A utilização de dois interruptores instalados em posições longitudinais conhecidas ao longo do tubo, permite a medição da velocidade de translação das bolhas de gás. O sinal de um terceiro interruptor, instalado a jusante dos dois primeiros, fornece o sinal de disparo para o sistema *SPIV* realizar a medição do campo de velocidade.

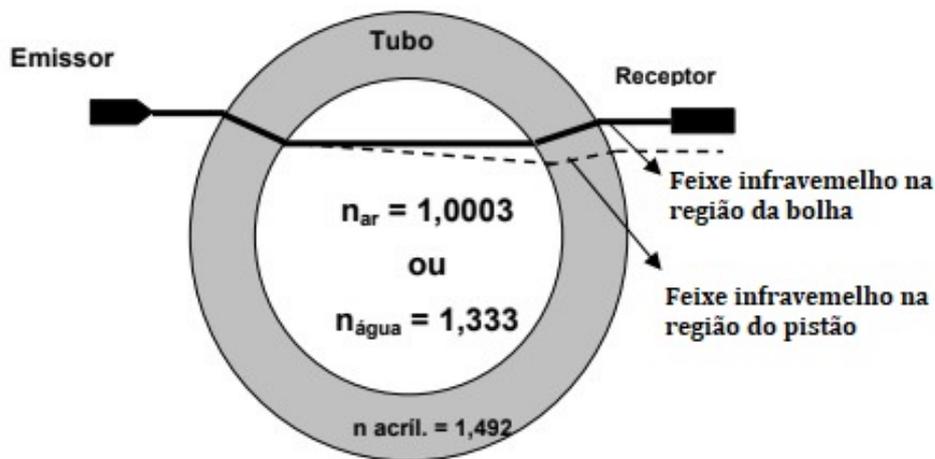


Figura 2.3: Funcionamento do sistema de interruptores de feixe. Adaptado de Fonseca Junior (2009)

3

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será feita uma breve descrição do escoamento intermitente e das principais variáveis utilizadas ao analisá-lo. Será feita, também, uma revisão bibliográfica dos principais artigos e trabalhos que buscaram obter, dentre outras grandezas, o campo de velocidades na fase líquida em um escoamento horizontal no padrão intermitente, objetivo principal deste trabalho.

3.1

Conceitos básicos

Nesta seção, serão mostradas as terminologias utilizadas no estudo do escoamento multifásico e as principais grandezas utilizadas na análise do escoamento intermitente.

3.1.0.1

Terminologias utilizadas no escoamento intermitente

Segundo Wallis (1969), um importante conceito para o estudo do escoamento intermitente, é a definição da célula unitária, uma região que contém uma bolha alongada e um pistão de líquido, conforme ilustrado na Figura 3.1.

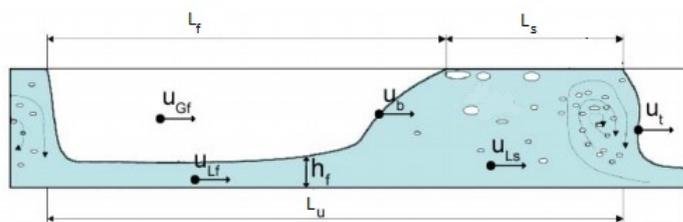


Figura 3.1: Célula unitária de golfada. Adaptado de (Carpintero-Rogero, 2009)

Algumas grandezas de interesse no estudo do escoamento intermitente, que estão ilustradas na Figura 3.1, são:

L_f - Comprimento na região de filme líquido, ou comprimento da bolha

L_s - Comprimento da região de pistão de líquido

- L_u - Comprimento da célula unitária, igual a soma de L_f e L_s
 u_{Gf} - Velocidade média da fase de 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 de líquido
 u_{LS} - Velocidade média da fase líquida na região do pistão
 u_t - Velocidade da traseira da bolha (ou frente do pistão de líquido)

A célula unitária, ilustrada na Figura 3.1, consiste em um pistão de líquido, que ocupa toda a seção transversal, podendo conter pequenas bolhas dispersas, seguido por uma bolha de gás. Este padrão se repete ao longo de todo o escoamento, ocasionando uma alternância entre as fases de líquido e de gás. Esta intermitência entre as fases, junto com um comportamento irregular atribui um caráter transiente ao padrão de escoamento estudado.

Na Figura 3-1, estão demonstradas as terminologias utilizadas para analisar este padrão de escoamento, tais como: a bolha de gás, que se propaga com velocidade u_b e tem comprimento L_f , também chamado de comprimento da região de filme líquido. Já a velocidade média na fase líquida na região do pistão é definida como u_{LS} , sendo u_B a velocidade das bolhas dispersas escoando no pistão de líquido, este de comprimento L_S . Em escoamento horizontal, é comum considera-se $u_{LS} = u_B$.

Por outro lado, a região de filme líquido é composta pela bolha de gás e pelo filme que escoar na parte inferior do tubo com velocidade u_{Lf} . A dimensão que demarca a distância da interface gás-líquido com a parede do tubo inferior é denominada altura do filme líquido, h_f .

3.1.1

Grandezas definidas no escoamento bifásico gás-líquido

No campo de estudo de escoamentos bifásicos gás-líquido, utiliza-se o subscrito G para se referir a fase gasosa e L para a fase líquida. Dentre os conceitos abordados, o mais simples é o da velocidade média de cada fase, u , definida nas equações 3-1 e 3-2, onde Q é a vazão volumétrica e A é a área da seção transversal ocupada pelo líquido ou pelo gás.

$$u_G = \frac{Q_G}{A_G} \quad (3-1)$$

$$u_L = \frac{Q_L}{A_L} \quad (3-2)$$

A relação entre o volume ocupado pela fase líquida e o volume total de uma região de um volume de controle na tubulação é denominado de *hold-up* líquido, cujo símbolo adotado nessa dissertação é α_L . Da mesma maneira, a fração ocupada pelo gás recebe o nome de fração de vazio (*void fraction*), que será aqui representada pelo símbolo α_G . No limite em que a espessura do volume de controle tende a zero, as frações ocupadas por cada fase podem ser calculadas a partir da área na seção transversal ocupada pela mesma, conforme disposto nas equações 3-3 e 3-4.

$$\alpha_G = \frac{A_G}{A} \quad (3-3)$$

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A} \quad (3-4)$$

Por consequência, a seguinte relação também é válida:

$$\alpha_G + \alpha_L = 1 \quad (3-5)$$

Apesar de comuns na literatura, a fração de vazio e a velocidade de cada fase podem (e costumam) variar para diferentes instantes do escoamento (principalmente no caso do escoamento intermitente). Nesse contexto surge a definição de velocidade superficial (ou fluxo volumétrico), sendo esta, a velocidade de cada fase, caso esta escoasse sozinha na tubulação. A velocidade superficial é calculada, portanto, como a razão entre a vazão de cada fase e a área transversal da tubulação, conforme disposto nas equações 3.2 e 3.3. O símbolo utilizada é a letra j .

$$j_G = \frac{Q_G}{A} \quad (3-6)$$

$$j_L = \frac{Q_L}{A} \quad (3-7)$$

Consequentemente, a velocidade da mistura, j_m , pode ser definida de acordo com a equação 3.4 abaixo:

$$j_m = \frac{Q}{A} = \frac{Q_G + Q_L}{A} = j_G + j_L \quad (3-8)$$

Devido a evidente vantagem de definir o escoamento bifásico gás-líquido em função das velocidades superficiais, diversos mapas de configurações do escoamento, como o de Mandhane et al. (1974), e grandezas do escoamento, como a velocidade de translação da bolha de gás, são descritos em função da velocidade superficial das fases.

3.2

Velocidade de translação da bolha alongada

A velocidade de translação da bolha alongada é a velocidade com a qual a fase gasosa, estruturada na forma de uma bolha de gás, translada na tubulação. É um consenso na literatura que a velocidade de translação da bolha de gás é maior que a velocidade da mistura.

Para um escoamento bifásico intermitente desenvolvido, os pistões de líquido não variam mais em comprimento. Nesse caso, a velocidade da cauda da bolha (u_t) se torna igual à velocidade do nariz da bolha (u_b) (Carpintero-Rogero et al., 2006)

A maior parte dos experimentos conduzidos com o objetivo de medir a velocidade de translação da bolha de gás, foram realizados para o caso de uma única bolha alongada se propagando em um líquido em movimento (*single elongated bubble flow*). Um dos primeiros trabalhos a propor uma equação para a velocidade de translação da bolha, na configuração vertical, foi o de Nicklin (1962). Os autores propuseram uma relação linear com a velocidade do pistão de líquido a jusante da bolha, u_L , conforme exposto na equação 3-9,

$$u_b = C_o u_L + u_d \quad (3-9)$$

onde C_o é uma constante e u_d a velocidade de ascensão da bolha em líquido estagnado (ou a velocidade de deslizamento da fase gás em relação à fase líquida).

Como a velocidade de deslizamento ocorre devido à gravidade, alguns autores, com base nos estudos de Nicklin (1962), decidiram que esta deveria ser desprezada para escoamento horizontal. Desta forma, foi proposta por Gregory e Scott (1969) a seguinte equação para escoamento horizontal:

$$u_b = 1,35 j_m \quad (3-10)$$

Dukler e Hubbard (1975), por outro lado, não consideraram C_o como constante e elaboraram a seguinte relação para o escoamento horizontal (também desprezando a velocidade de deslizamento):

$$u_b = [1 + (0,021 \ln(Re_S) + 0,022)] j_m \quad (3-11)$$

$$Re_S = \frac{(\alpha_{GS}\rho_G + \alpha_{LS}\rho_L)j_m D}{\alpha_{GS}\mu_G + \alpha_{LS}\mu_L} \quad (3-12)$$

Com base em um experimento realizado com óleo e ar, Nicholson et al. (1978) afirmaram que a velocidade de deslizamento não poderia ser desprezada

e que sua relevância está relacionada com o diâmetro da tubulação. As seguintes relações foram propostas:

$$u_b = 1,196j_m + 0,27 \quad \text{para } D = 25,8mm \quad (3-13)$$

$$u_b = 1,128j_m + 0,28 \quad \text{para } D = 51,2mm \quad (3-14)$$

Diversos autores buscaram correlacionar a velocidade de translação bolha com números adimensionais, como número de Froude. Bendiksen (1984), considerou relevante a competição existente entre a força gravitacional e as forças de inércia para a definição deste parâmetro. Segundo este autor, os coeficientes C_o e u_d são dependentes do número de Froude.

Existe, segundo Bendiksen (1984), uma transição para a velocidade de translação da bolha alongada dada pelo número de Froude, e que esta varia com a inclinação da tubulação. A partir dos dados obtidos por tal autor, é comum encontrar na literatura, para o caso horizontal, as seguintes relações:

$$\begin{aligned} u_b &= 1,05j_m + 0,54\sqrt{gD} & \text{para } Fr < 3,5 \\ u_b &= 1,2j_m & \text{para } Fr > 3,5 \end{aligned} \quad (3-15)$$

Hurlburt e Hanratty (2002) utilizaram os dados experimentais de Woods e Hanratty (1996) e propuseram uma nova divisão nas regiões do número de Froude. Em escoamentos com $Fr < 2$, os autores documentaram efeitos gravitacionais como sendo mais significativos em relação aos efeitos de inércia. Já para número de Froude na faixa de $2 < Fr < 3,5$, ambos os efeitos foram considerados relevantes, enquanto para valores mais elevados, $Fr > 3,5$, os efeitos de inércia predominam sobre os efeitos da ação da gravidade. As equações propostas são demonstradas nas equações 3-15 e 3-16 abaixo:

$$\begin{aligned} u_b &= 1,0j_m + 0,542\sqrt{gD} & \text{para } Fr < 2 \\ u_b &= 1,1j_m + 0,542\sqrt{gD} & \text{para } 2 < Fr < 3,5 \\ u_b &= 1,2j_m & \text{para } Fr > 3,5 \end{aligned} \quad (3-16)$$

3.3

Medições de campos de velocidade na fase líquida em escoamento horizontal intermitente

3.3.1

Evolução da técnica experimental

Nesta subseção serão analisados os principais trabalhos experimentais, em ordem cronológica, que buscaram obter o campo de velocidades na fase líquida em escoamento horizontal intermitente.

Sharma et al. (1998) buscaram determinar informações sobre o perfil de velocidade na direção axial, na fase líquida como uso de anemômetro de filme quente.

O uso de anemômetro de filme quente, como discutido no capítulo 2, é uma técnica pontual de medição, não fornecendo informações do campo completo de velocidade para escoamentos transientes, como é o caso dos escoamentos intermitentes gas-líquido. Além disso, Sharma et al. (1998) não realizaram um número suficiente de medições instantâneas de velocidade de modo a garantir a convergência estatística dos valores da velocidade média reportada em cada ponto. Portanto, os dados apresentados podem não representar fielmente o perfil médio de velocidade na direção axial.

Um avanço considerável na medição de vetores velocidade no escoamento intermitente foi feita por Carpintero-Rogero et al. (2006), Os autores foram os primeiros a utilizar a técnica de *PIV* para medir vetores de velocidade em um escoamento intermitente horizontal. Os experimentos foram realizados em conjunto com a técnica de luz pulsada de fundo e Fluorescência Induzida por Laser - *LIF*. O trabalho teve como objetivo medir dois componentes dos vetores de velocidade, na região imediatamente a jusante ou imediatamente a montante da bolha de gás. Os experimentos foram realizados com água e ar, em uma seção de medição com um tubo de 54mm de diâmetro interno e 11 metros de comprimento. Os resultados, entretanto, não apresentam campos de velocidade baseados na média de diversas imagens. Em Carpintero-Rogero (2009), a autora utilizou um máximo de 10 campos vetoriais instantâneos medidos para calcular o campo médio de velocidades próximo a bolha, não obtendo, portanto, perfis de velocidade que possam ser considerados estatisticamente convergidos.

Fonseca Junior (2009), utilizou-se das mesmas técnicas de Carpintero-Rogero (2009) para obter os perfis médios das componentes u e v do vetor de velocidades, na fase líquida, em um escoamento intermitente horizontal. Campos médios das componentes de velocidade foram obtidos a partir de médias de 150 aquisições, para 6 conjuntos de velocidades superficiais de líquido

e gás. Outra diferença entre estes trabalhos foi a distância entre a região de medição e a entrada da seção de testes. Enquanto Fonseca Junior (2009) mediu a $400D$ do início da seção de testes, Carpintero-Rogero (2009) tinha sua região de medição a $89D$ da entrada da seção. Esta diferença, garante uma melhor condição para o desenvolvimento do escoamento, no trabalho de Fonseca Junior (2009).

Czapp et al. (2012) utilizou pela primeira vez a técnica de *PIV* estereoscópica na fase líquida de um escoamento intermitente gás-líquido em tubo horizontal. Os experimentos foram realizados com água e ar em uma tubulação de $54mm$ de diâmetro interno.

Medidas com as técnicas de *SPIV* e de *PIV* planar tradicional foram efetuadas para escoamento monofásico de líquido para diversas vazões. O perfil médio de velocidade na direção axial obtido com as duas técnicas foi comparado, apresentando excelente concordância.

Após validação da técnica *SPIV*, esta foi utilizada para obter o perfil da componente axial (w) da velocidade da fase líquida, em diferentes regiões da célula unitária.

Apesar do avanço considerável na medição das três componentes do vetor velocidade em um mesmo plano, não foram apresentados campos vetoriais baseados na média de diversas aquisições, seja no tempo ou no espaço. Como diversas grandezas do escoamento intermitente são reconhecidamente estocásticas, a avaliação do escoamento a partir de campos instantâneos de velocidade dificulta o perfeito entendimento da física envolvida no fenômeno.

Recentemente, Fernandes et al. (2018) realizaram medições dos três componentes de vetor velocidade para a fase líquida de escoamentos intermitentes gás-líquido em duto horizontal. Aparentemente, estes autores foram os primeiros a obter campos médios de velocidade bem convergidos estatisticamente, baseados em 150 amostras. A técnica utilizada foi a técnica de *SPIV*, empregando foto sensores como *triggers* para a medição de campos de velocidade em posições pré-definidas em relação ao nariz da bolha de gás, tanto no pistão quanto no filme de líquido. Os testes foram realizados em tubos de $40mm$ de diâmetro interno para uma solução de glicerina e ar como fluidos de trabalho. Para a vazão estudada, o número de Reynolds correspondia a um escoamento no regime laminar para a fase líquida.

3.3.2

Resultados relevantes

Esta subseção é dedicada a discutir alguns dos resultados relevantes dos trabalhos experimentais citados, além de apresentar, também, resultados de

uma simulação numérica tridimensional, disponível na literatura.

Fonseca Junior (2009) apresentou em seus resultados, entre outros aspectos, perfis de velocidade axial para velocidades superficiais de gás $j_G = 0, 5 \text{ m/s}$ e de líquido $j_L = 0, 3, 0, 4$ e $0, 5 \text{ m/s}$. A Figura 3.2 mostra os perfis de velocidade axial nas regiões de pistão de líquido e filme líquido.

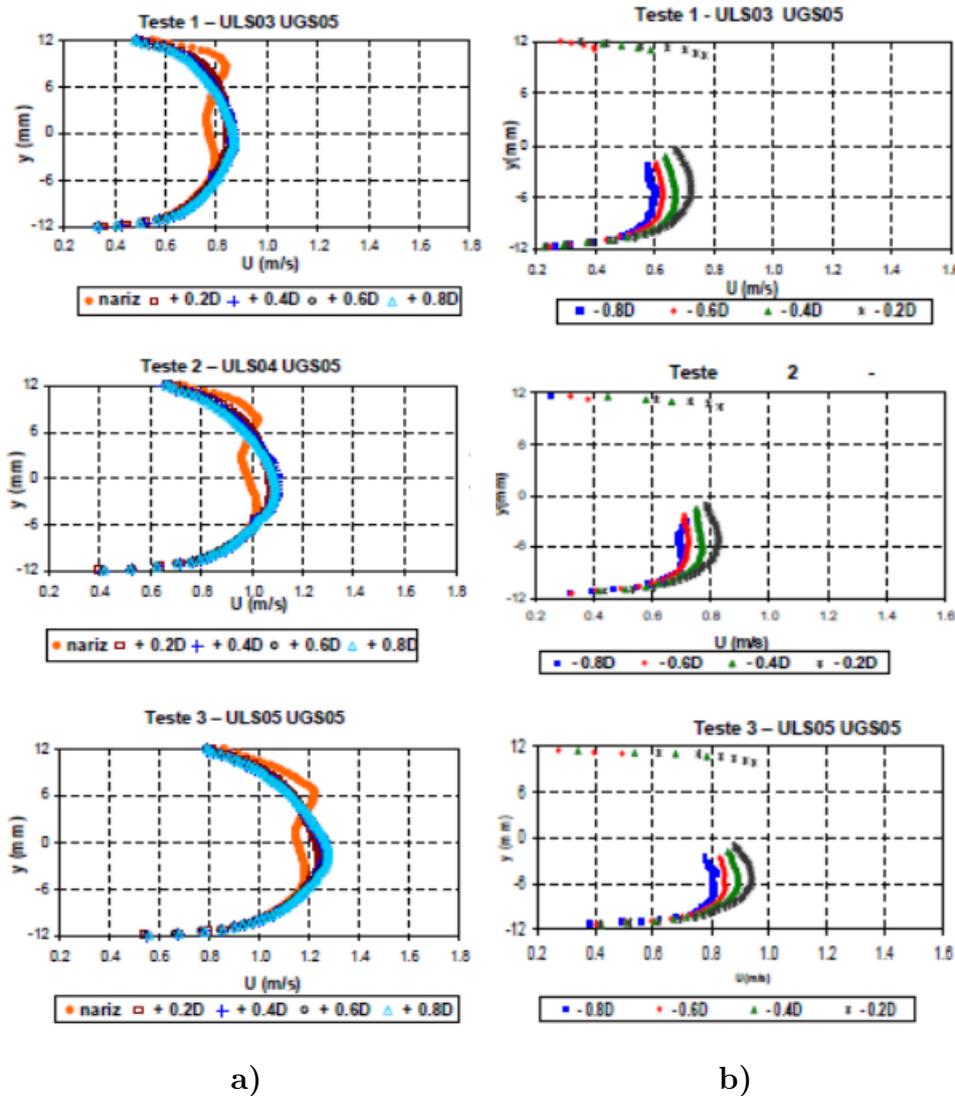


Figura 3.2: Perfis de velocidade média na região de a) pistão de líquido b) filme de líquido. (Fonseca Junior, 2009)

É interessante notar que, na região de filme líquido, próximo à interface gás-líquido, há uma variação na derivada do perfil de velocidade axial, o que indica uma velocidade menor da interface em relação a outros pontos no interior do filme. Já na região de pistão de líquido, Fonseca Junior (2009) observou um aumento na velocidade com o aumento da velocidade de mistura. Além disso, na região próxima ao nariz da bolha, o perfil de velocidades apresentava um

comportamento diferente das demais regiões, que foi atribuído pelo autor a um efeito do deslocamento do líquido pela bolha de gás, que se move em maior velocidade.

Febres et al. (2010) executou uma simulação numérica, utilizando o *software* comercial FLUENT TM, e comparou seus resultados com os dados experimentais obtidos por Fonseca Junior (2009). A captura e comportamento da interface foi descrita através do modelo *VOF*, e a turbulência foi modelada a partir do modelo $k - \varepsilon$ RNG. As equações foram resolvidas utilizando-se do método numérico de volumes finitos.

Os resultados numéricos e experimentais mostraram excelente concordância para a região de filme líquido. A Figura 3.3 mostra os perfis experimentais, pontilhados, em comparação com os perfis teóricos para velocidade superficial de gás $j_G = 0,5 \text{ m/s}$ e de líquido $j_L = 0,4 \text{ m/s}$.

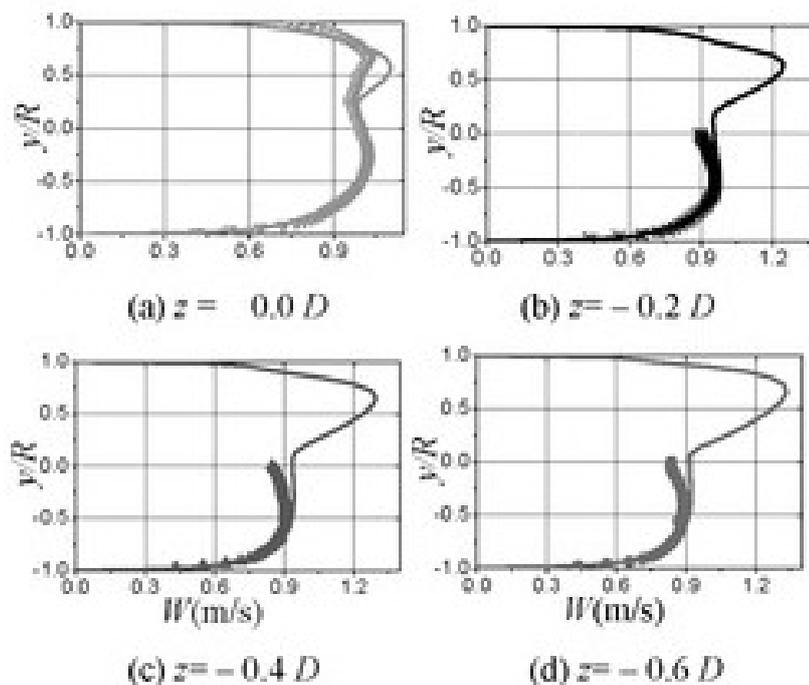


Figura 3.3: Perfis de velocidade axial a jusante do nariz da bolha. (Febres et al., 2010). Comparação com dados experimentais de Fonseca Junior (2009)

A velocidade menor da interface gás-líquido, observada nos dados experimentais, não foi verificada em todos os pontos, para o caso numérico que, apresentou, em geral, uma transição suave do perfil de velocidade do líquido para o de gás.

Febres et al. (2010) analisaram, também, o campo de velocidade na seção transversal nas regiões de líquido e gás para velocidade superficial de

gás $j_G = 0,5 \text{ m/s}$ e de líquido $j_L = 0,3 \text{ m/s}$, como apresentado na Figura 3.4

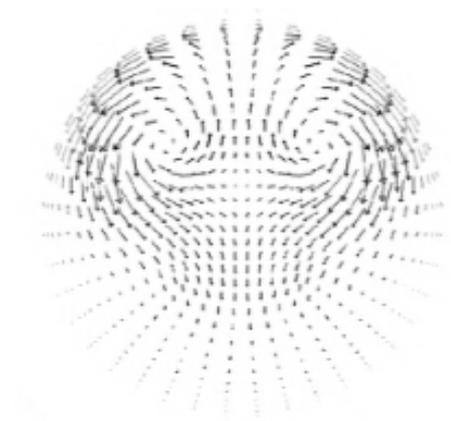


Figura 3.4: Campo de velocidade na seção transversal para uma distância de $0.4D$ a jusante do nariz da bolha. Adaptado de (Febres et al., 2010)

Os autores observaram uma forte recirculação na fase gasosa que começa com movimento ascendente na interface e se propaga até o topo da tubulação, retornando junto à parede do tubo.

No trabalho de Fernandes et al. (2018), os campos vetoriais médios da fase líquida obtidos na região do filme de líquido demonstram ser, qualitativamente, semelhantes aos resultados da simulação de Febres et al. (2010). Como pode ser observado na Figura 3.5, um movimento circulatório foi detectado na vizinhança da bolha.

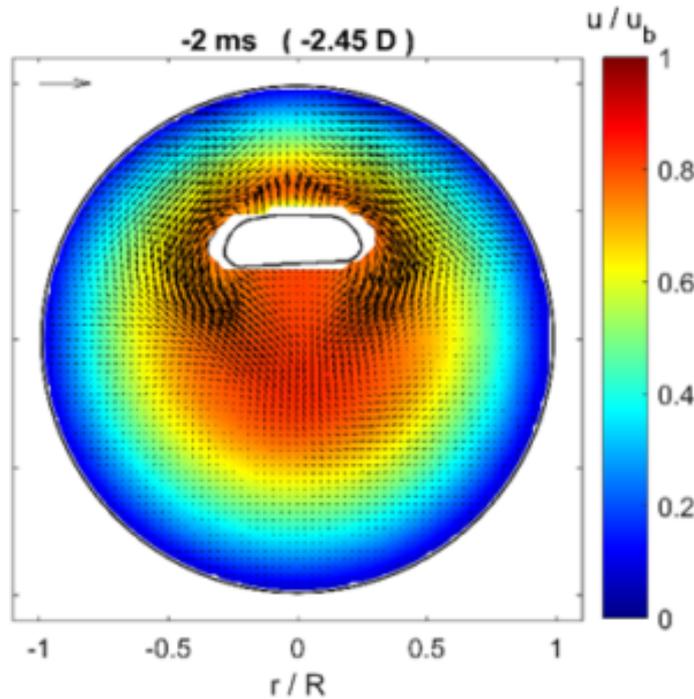


Figura 3.5: Componentes médios de velocidade u e v , representados por vetores, e componente axial w em escala de cores para posição a montante do nariz da bolha alongada. (Fernandes et al., 2018).

Os perfis de velocidade axial na região próxima ao nariz da bolha obtido por Fernandes et al. (2018) apresentaram semelhança às medições de Fonseca Junior (2009). A deformação notada nestes perfis é atribuída ao deslocamento do líquido pela bolha, que se movimenta em maior velocidade. Esta análise é reforçada pelos dados de campo de velocidade média da componente v do vetor velocidade que apresenta, para regiões próximas ao nariz da bolha, um efeito de aceleração do líquido, ao longo do eixo central da tubulação, no sentido descendente. Este efeito, pode ser considerado como influência da chegada iminente da bolha de gás.

3.3.3 Avaliação do estado da arte

Os trabalhos apresentados neste capítulo, mostram que diversos autores utilizaram variadas técnicas de medição para tentar obter os componentes dos vetores de velocidade em um escoamento intermitente em tubo horizontal. Entretanto, há uma lacuna na literatura referente a trabalhos que apresentem campos vetoriais, dentro do pistão e do filme líquido, estatisticamente convergidos, e para diversas combinações de velocidades superficiais.

Esta lacuna começou a ser preenchida pelo trabalho de Fernandes et al. (2018), onde medidas para a fase líquida em regime laminar, e para uma faixa

limitada de vazões foram apresentadas.

O presente trabalho teve por objetivo dar continuidade ao trabalho de Fernandes et al. (2018), utilizando a técnica de *SPIV* para a obtenção de campos médios dos três componentes do vetor velocidade para escoamento turbulento de gás e líquido em tubulação horizontal. Três combinações diferentes de velocidades superficiais de gás e líquido foram investigadas. O principal diferencial entre os dois trabalhos está no fato que Fernandes et al. (2018) utilizaram uma mistura de alta viscosidade de água e glicerina como fase líquida, caracterizando um escoamento no regime laminar. A utilização de água no presente trabalho fez com que o escoamento da fase líquida fosse turbulento, o que gerou dificuldades para a aplicação da técnica *SPIV*.

Este trabalho busca contribuir, portanto, não só oferecendo dados sobre o comportamento tri-dimensional do escoamento da fase líquida, para a validação de modelos matemáticos, mas também para o entendimento da dinâmica do escoamento turbulento gás-líquido, no padrão intermitente, em dutos horizontais.

4 Experimento

Este capítulo é dedicado a apresentação da seção de testes utilizada no presente trabalho. Serão descrito também, os procedimentos experimentais adotados para a obtenção dos resultados de interesse, expostos no Capítulo 5.

4.1 Seção de testes

Nesta seção, será descrita a seção de testes como um todo, os sistemas adotados para escoamento líquido e ar, além da estação de medição utilizada. Em seguida, os componentes do sistema de *SPIV* utilizado serão discutidos, assim como o alvo de calibração (desenvolvido por Fernandes et al. (2018)) e o sistema de interrupção de feixes.

4.1.1 Descrição geral da seção de testes

A seção de testes deste trabalho consiste em tubos de acrílico de diâmetro interno de 40mm ($L/D = 442,5$). A tubulação é apoiada sobre uma estrutura de perfis de alumínio do tipo Bosch, com dimensões de $45 \times 45\text{mm}$, garantindo rigidez e alinhamento da mesma.

Ar e água são misturados na entrada da seção, por um misturador em Y. Por restrições de espaço no laboratório, uma curva horizontal com 30cm de diâmetro foi utilizada, esta posicionada $7,7$ metros após o início da seção de teste.

Ao final da tubulação, o líquido utilizado retorna ao tanque de armazenamento (circuito fechado) e o ar é ventilado para o laboratório (circuito aberto). As figuras Figura 4.1 e Figura 4.2 ilustram, respectivamente, a seção de testes em um desenho *3D* e em um desenho esquemático, de modo a proporcionar ao leitor uma visão geral mais clara da mesma.

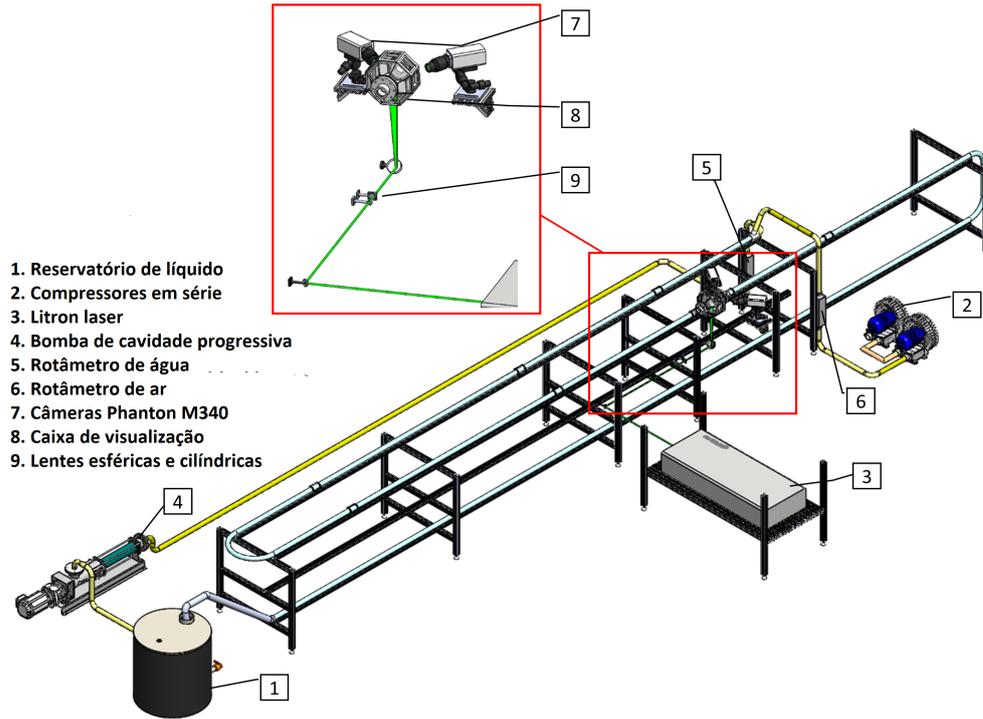


Figura 4.1: Desenho tridimensional da seção de testes.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1621941/CA

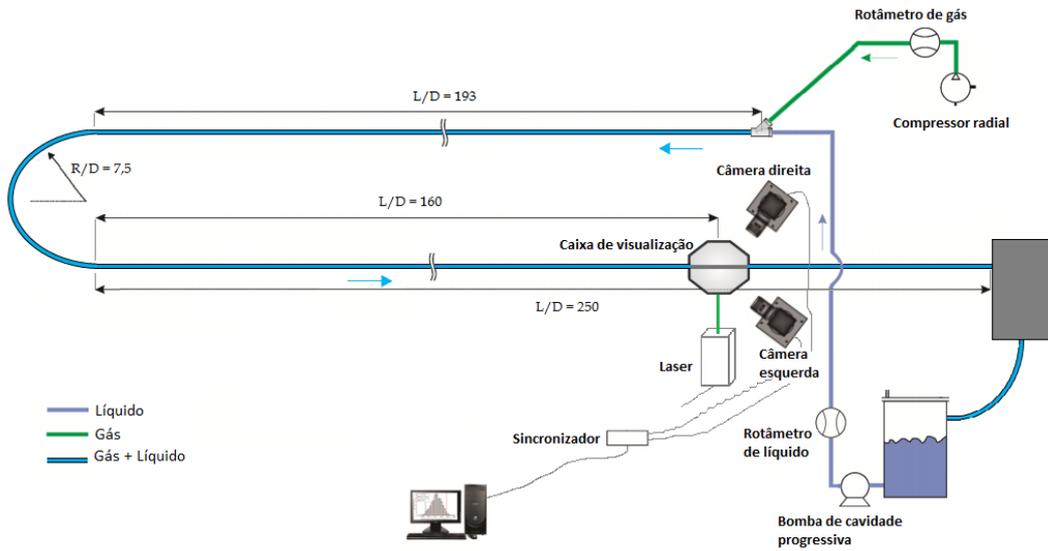


Figura 4.2: Desenho esquemático da seção de testes.

4.1.2

Sistema de bombeamento de líquido

O sistema de bombeamento de líquido é composto por uma bomba de cavidades progressivas (*BCP*) e um tanque de armazenamento. Este tipo de bomba foi escolhida por ser capaz de fornecer uma vazão constante e independente da pressão na linha de descarga. Tal característica é desejada devido às oscilações de pressão naturais na tubulação causadas pelo escoamento intermitente.

A *BCP* foi controlada por um inversor de frequência capaz de manipular a rotação da bomba, alterando, assim, a vazão de líquido.

4.1.2.1

Bomba de cavidades progressivas e inversor de frequência

A bomba utilizada no experimento foi fabricada pela Netzsch, modelo NM031. Foi feito um procedimento, para sua calibração, obtendo a curva Vazão (m^3/s) x Frequência (Hz). O inversor de frequência utilizado era da marca WEG.

A calibração da bomba de cavidades progressivas foi feita a partir da determinação da vazão em 6 frequências diferentes, na faixa de 15 *Hz* a 35 *Hz*, com espaçamento de 4 *Hz*. Para cada frequência, o tempo e a massa necessária para encher um recipiente foram medidos e, com esses dados, o volume e a vazão foram obtidos. As medidas foram efetuadas em triplicata.

Foi traçado, então, um gráfico Frequência x Vazão para que, em seguida, de posse da área de seção do tubo, fosse possível calcular a velocidade superficial e com isso, obter um gráfico de operação Frequência x Velocidade superficial de líquido, conforme ilustrado na Figura 4.3.

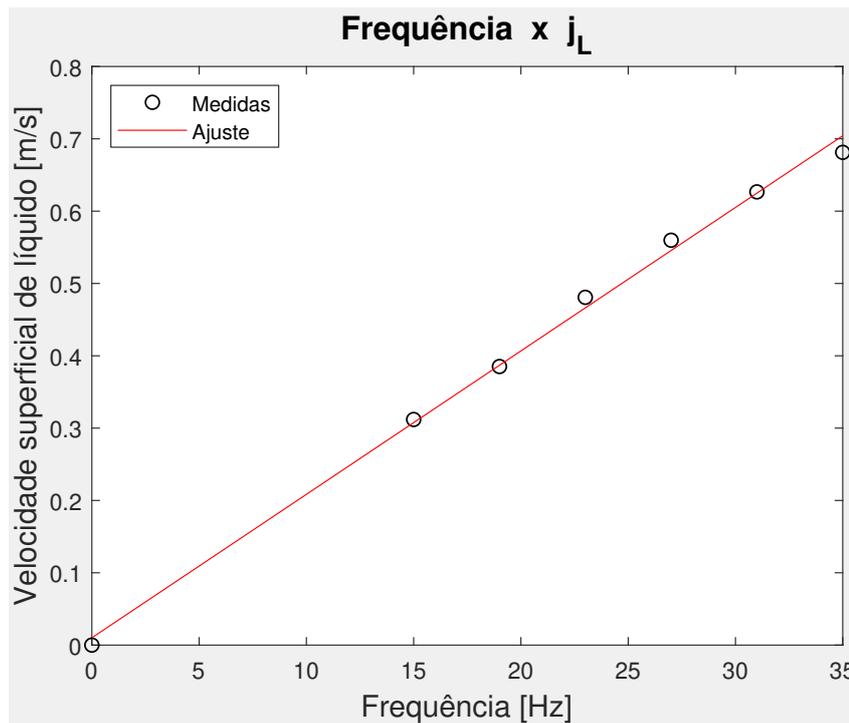


Figura 4.3: Curva de operação da bomba de cavidades progressivas utilizada.

4.1.2.2

Tanque de líquido

A Figura 4.4 mostra o tanque de 300L da Alpina Termoplásticos utilizado. Foram feitas duas entradas na tampa do tanque para o retorno do líquido e um respiro para a saída de ar para atmosfera. Uma válvula de 2" foi posicionada na parte inferior, seguida de uma redução de 1 1/2" e uma conexão, de forma a esvaziar o tanque sem desmontar a seção de testes. Apesar da capacidade do tanque, foram utilizados apenas cerca de 150L, a fim de economizar partículas fluorescentes.



Figura 4.4: Tanque de capacidade 300L utilizado para armazenamento de líquido e separação de fases durante o experimento.

4.1.3 Sistema de escoamento de ar

O sistema de escoamento de ar, formado por dois compressores radiais em série, da marca WEG e modelo CRE-04, de 4cv. Estes, fornecem uma vazão máxima de aproximadamente $2m^3/min$. Assim como no sistema de escoamento de líquido, um inversor de frequência da marca WEG controlava a frequência de rotação do motor, garantindo a possibilidade de variar as vazões de gás impostas.

Um rotâmetro de ar da marca OMEGA, com faixa de atuação de 0,2 a $9,0m^3/h$, foi utilizado para medir a vazão de gás na entrada da seção de testes.

4.1.4

Caixa de visualização

Devido a distorção ótica causada pela luz ao passar por meios com índice de refração diferentes, foi utilizada uma caixa de visualização de acrílico, desenvolvida por Fernandes (2017). Esta, foi fabricada em acrílico, com 24 faces distintas, de forma a permitir o acesso ótico por diferentes regiões.

A caixa de visualização foi projetada de modo a ser facilmente adaptada para diferentes diâmetros de seção, trocando apenas o flange. Este, feito de PVC, é fixado na estrutura de alumínio, Bosch, garantindo a posição da caixa de visualização durante todo o experimento. Um anel de borracha (*O-ring*) posicionado em um canal na face do flange de contato com a caixa garante a vedação por compressão. Ao encher a caixa de visualização com o mesmo fluido que está escoando na tubulação (no caso, água), os efeitos de distorção óticos descritos são minimizados. A Figura 4.5 mostra a caixa de visualização fixada na seção através dos flanges de PVC, que ilustram a seção de testes

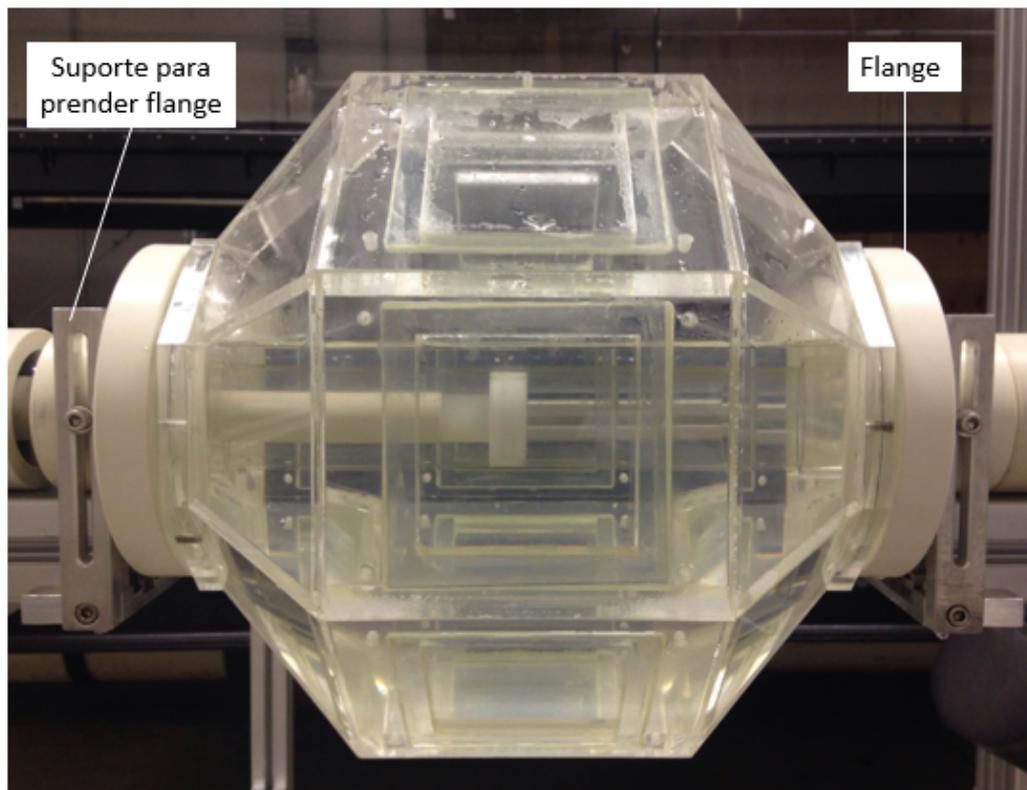


Figura 4.5: Foto da caixa montada na seção de testes, com o alvo de calibração em seu interior (Fernandes, 2017).

4.1.5

Sistema de *PIV* estereoscópico

Nesta subseção, serão descritos os principais equipamentos utilizados para executar a técnica de velocimetria estereoscópica empregada.

4.1.5.1

Câmeras

Duas câmeras Phantom Miro M340, foram utilizadas neste experimento. Estas, possuem 12GB de memória RAM tamanho de pixels de $10 \times 10 \mu m$. A resolução das câmeras, em pixels, utilizada neste trabalho foi de 1280×1280 , com frequência de aquisição de $400 Hz$. Adaptadores Scheimpflug, da LaVision, foram utilizados para garantir o foco na região de medição, enquanto a ampliação correta foi obtida com lentes de $105 mm$ Micro Nikkor da Nikon. A abertura focal selecionada foi $f\#11$, como será explicado na seção 4.2.1.2.

No arranjo experimental, as câmeras foram posicionadas horizontalmente a jusante do plano de laser e em lados opostos do tubo, com um ângulo de 90° entre elas.

4.1.5.2

Sistema de iluminação

O sistema de iluminação é composto pelo laser e pelo conjunto ótico de lentes e espelhos que, juntos, geram o plano que ilumina a região de medição. Neste trabalho, foi utilizado um laser Litron LDY304. Este laser, tem capacidade de emissão de $2 \times 30 mJ$ de energia por pulso, quando utilizado com frequência de pulsação de $1 kHz$. Logo, é possível obter aquisições em alta frequência. A luz emitida tem a cor verde, com comprimento de onda de aproximadamente $527 nm$.

4.1.5.3

Sincronizador

O sincronizador de modelo 610036, da TSI foi utilizado para sincronizar o tempo de aquisição do sistema *SPIV*. Além disso, o mesmo também recebe um sinal externo de um interruptor de feixes que determina o início da captura de imagens, conforme será explicado adiante na subseção 4.1.6. O software Insight 4G, também da TSI, foi utilizado para configurar o sistema de sincronização e também para o processamento das imagens adquiridas.

4.1.5.4 Partículas

Conforme descrito na seção 2.2, as técnicas de velocimetria quando combinadas com a técnica de fluorescência induzida por laser (explicada na seção 2.4) necessitam de partículas traçadoras que acompanhem o escoamento, mantendo suas características.

Neste trabalho foram utilizadas partículas de poliestireno impregnadas com Rhodamina 6G com diâmetros variando entre $1\mu m$ a $20\mu m$ e densidade de $1,19g/cm^3$. Os comprimentos de onda de excitação e emissão são 542 e $612nm$, respectivamente.

4.1.5.5 Filtro ótico

Como visto na seção 2.4, um filtro ótico deve ser usado entre a câmera e o plano de medição de maneira a deixar passar apenas a radiação acima de certo comprimento de onda. Filtros passa alta da Newport, modelo FSQ-OG550, com faixa de corte da ordem de $550nm$ foram utilizados durante os experimentos.

4.1.5.6 Alvo de calibração

Conforme descrito na seção 2.3.2, a técnica de *PIV* estereoscópico precisa de um procedimento de calibração para ser executada e para isso, se faz necessário o uso de um alvo de calibração. Este, composto por pontos separados por uma distância conhecida e uma marcação central em cruz que indica a origem do plano cartesiano, conforme ilustrado na Figura 4.6. Desta forma, é possível determinar os parâmetros da função de mapeamento que permite distorção da imagem e posterior reconstrução e a geração do vetor tridimensional.

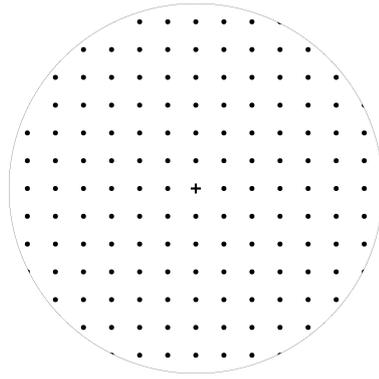


Figura 4.6: Alvo utilizado para a calibração da técnica *SPIV*.

Fernandes (2017) desenvolveu um equipamento constituído de uma luva de vedação, para encaixe vedado na parede externa da tubulação, um eixo para fixação do alvo, um micrômetro Mitutoyo, de resolução de $10\mu m$ e um suporte conectando o eixo do alvo ao micrômetro. A Figura 4.7 mostra tal aparato de calibração.

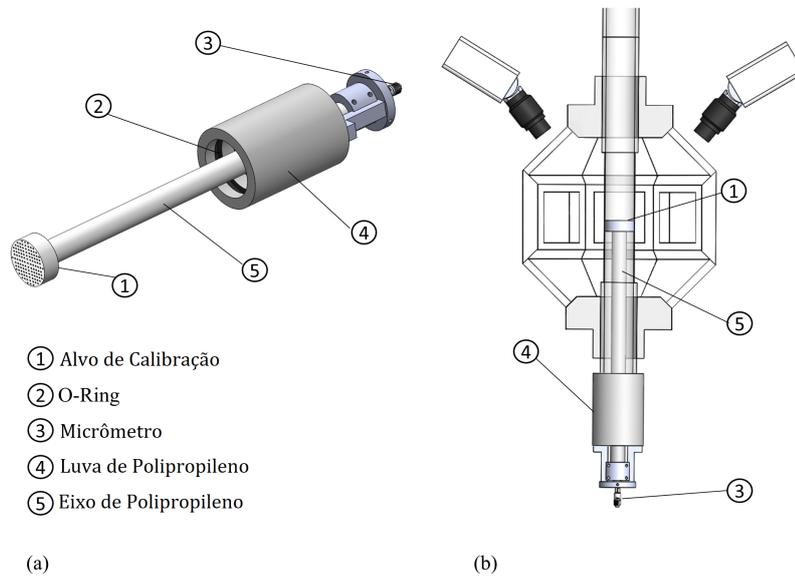


Figura 4.7: Aparato desenvolvido por Fernandes (2017) para posicionar o alvo de calibração na região de medição. Adaptado de (Fernandes et al., 2018)

Na Figura 4.5, o alvo se encontra posicionado na região do plano de laser,

onde são capturadas as imagens para o processo de calibração. Informações mais detalhadas sobre o alvo de calibração, podem ser encontradas no trabalho de Fernandes (2017)

4.1.6 Sistema de interruptores de feixe

Na seção 2.5, foi explicado o funcionamento do sistema de interruptores de feixe utilizado para medir a velocidade de translação da bolha alongada. Três sensores da marca Pasco foram montados a aproximadamente 350 diâmetros da entrada da seção, e com espaçamento entre si de cerca de 200mm. A Figura 4.8 mostra o sistema em operação na seção de testes. Detalhes sobre o procedimento experimental serão abordados na seção 4.2.4.1.



Figura 4.8: Sistema de interruptores de feixe.

4.2 Procedimento Experimental

Nesta seção, serão apresentados os procedimentos adotados para a execução dos experimentos para a obtenção dos campos vetoriais expostos no capítulo 5.

4.2.1 Pontos de operação

Como visto na seção 1.2, as investigações em escoamento multifásico buscam determinar a dependência do padrão de fases com alguns parâmetros, dentre eles, o fluxo volumétrico. No presente trabalho, três velocidades superficiais de líquido foram investigadas enquanto a velocidade superficial de gás foi mantida fixa. A Tabela 4.1 resume os pontos escolhidos e a Figura 4.9

ilustra em que região os pontos de operação se encontram no mapa de padrões de escoamento de Mandhane et al. (1974)

Tabela 4.1: Pontos de operação

Caso	j_L	j_G	j_m	Fr_m	Re_m
1	0,3 (m/s)	0,5 (m/s)	0,8 (m/s)	1,28	32000
2	0,4 (m/s)	0,5 (m/s)	0,9 (m/s)	1,44	36000
3	0,5 (m/s)	0,5 (m/s)	1,0 (m/s)	1,60	40000

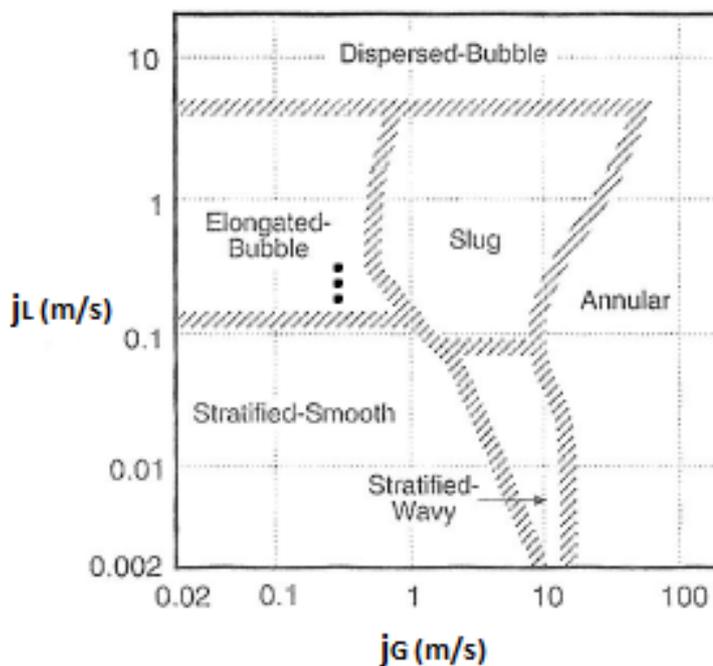


Figura 4.9: Identificação dos pontos de medição no mapa de padrões de escoamento de Mandhane et al. (1974)

4.2.1.1

Parâmetros para a técnica de *SPIV*

Segundo Westerweel (1997), para imagens cujas partículas apresentam cerca de $d^* = 2$ pixels de diâmetro, a incerteza no pico de correlação, nos mapas de correlação cruzada, obtidos a partir do deslocamentos das janelas de interrogação, se mostra menor. Em grandes partes das aplicações de PIV, o tamanho das partículas é controlado pela difração da luz devido à abertura da câmera (Abrantes et al., 2012). Esta deve, portanto, ser ajustada de modo

a garantir que o tamanho médio das partículas, na imagem, fique na faixa de 2 pixels.

O procedimento adotado por Fernandes (2017), indica como obter tais parâmetros para a configuração da técnica aplicada. Foi possível determinar o diâmetro teórico das partículas na imagem para diferentes aberturas de lente, como pode ser visto na Tabela 4.2. Estes valores foram calculados para magnificação $M = 0,3$ e o diâmetro real médio das partículas de $d_p = 10\mu m$.

Tabela 4.2: Diâmetro das partículas na imagem para diferentes aberturas da câmera

d*(pixel)	f#
6,22	32,0
4,28	22,0
3,12	16,0
2,16	11,0
1,58	8,0
1,13	5,6
1,00	4,0
1,00	2,8

Pela proximidade com o valor ideal, o valor escolhido para abertura das lentes foi o de $f\# = 11$. Dado que $f\#$ é determinado pelo diâmetro das partículas, é preciso calcular a profundidade de campo teórica, que é a espessura de um plano imaginário no qual todas as regiões da imagem estão em foco. Com o valor de $f\# = 11$, a profundidade de foco é, segundo Raffel et al. (2007), de $\delta_z = 6,78mm$. Como o plano de laser utilizado tinha $2mm$ de espessura, é possível afirmar que todas as partículas iluminadas se encontravam em foco.

Outro parâmetro necessário para a aplicação da técnica de *PIV* estereoscópica é a quantidade de partículas a serem adicionada na seção de testes. Seguindo o método apontado por Fernandes (2017), para o presente trabalho, o cálculo para concentração de partículas ideal indicou o uso de uma massa de $0,35g$. Entretanto, é importante ressaltar que com o decorrer do tempo, é comum partículas acumularem em alguns pontos da seção, diminuindo sua concentração, que deverá ser permanentemente ajustada.

4.2.2

Processo de calibração

A técnica de *SPIV*, exige um procedimento de calibração. Este, ocorre a partir de imagens de um alvo, antes da aquisição e processamento das imagens

das partículas. No presente trabalho, foram registradas imagens em três planos com espaçamento de $0,5mm$ entre si. Este procedimento é feito, alterando a posição do alvo descrito na seção 4.1.5.6, utilizando o aparato desenvolvido por Fernandes (2017), descrito na mesma seção. A posição do plano central de calibração deve coincidir com a região central da espessura do plano de laser.

A Figura 4.6, mostra a malha de pontos utilizada para a calibração. Os pontos são igualmente espaçados de $3mm$ entre si, servindo como coordenadas x e y para o processo de calibração. A coordenada z é dada pelo deslocamento do alvo, nas posições $-0,05mm$, $0mm$ e $0,05mm$. As imagens capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita foram digitalmente tratadas, em um procedimento de binarização, para que o *software* Insight 4G utilizado pudesse reconhecer os pontos da malha e, então, gerar a função de mapeamento. O procedimento precisou ser refeito para todos os casos. Este procedimento é descrito com mais detalhes no trabalho de Fernandes (2017).

Um procedimento de *self-calibration* (Raffel et al., 2007) foi, por último, aplicado usando imagens de um escoamento monofásico de água. Tal procedimento busca corrigir pequenos desalinhamentos entre o plano de laser e o alvo de calibração.

4.2.3

Validação da técnica

Em um trabalho experimental, a técnica de medição, antes de ser utilizada, deve ser validada usando um outro equipamento ou uma grandeza conhecida como base de comparação. No presente trabalho, a validação da técnica de *SPIV* foi executada com a medição do perfil de velocidade em um escoamento laminar monofásico hidrodinamicamente desenvolvido.

Para tal, a seção de testes foi completamente preenchida com água e uma vazão de $2,7 L/min$ foi imposta pela bomba de cavidade progressiva, o que corresponde a uma velocidade média de $0,036 m/s$ e $Re \simeq 1500$. Um total de 200 campos de velocidade foram medidos e então gerado um perfil médio.

Um escoamento laminar monofásico tem perfil de velocidade parabólico e sua maior componente de velocidade se encontra no centro da tubulação. Logo, os resultados da técnica *SPIV* para este escoamento, foram usadas de maneira a corrigir a posição do centro de coordenadas. A malha gerada, na qual os dados de *SPIV* foram processados, foi gerada durante o processo de calibração, tomando o centro do alvo como ponto de referência.

A Figura 4.10 mostra os perfis médios de velocidade em x e y , sendo z a direção do escoamento. Estes, foram ajustados a um perfil parabólico, no qual o ponto de velocidade máxima é o centro da tubulação. Desta forma, foi aplicada

uma correção na malha de $x_{corr} = 1,151\text{mm}$ na direção x e $y_{corr} = -0,496\text{mm}$ na direção y .

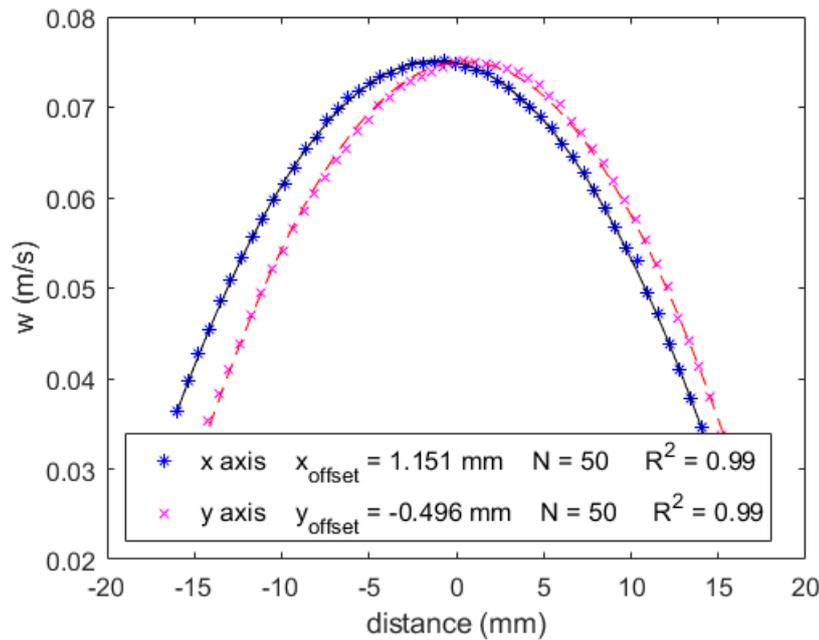


Figura 4.10: Correção da malha ao longo das direções X e Y .

Após a correção da malha, foi preciso validar a técnica comparando o perfil médio de velocidade com o perfil teórico para escoamento laminar monofásico hidrodinamicamente desenvolvido. Os resultados deste procedimento serão exibidos na seção 5.2.

4.2.4 Aquisição de dados

Nesta seção, serão apresentados os procedimentos para aquisição de dados referentes ao escoamento turbulento intermitente de gás-líquido em tubulação horizontal, foco de interesse do trabalho. Primeiramente, será descrito o processo para a obtenção de dados de velocidade de translação da bolha alongada. Em seguida, será descrito o processo de aquisição de dados com a técnica de *PIV* estereoscópico, além da metodologia utilizada para o processamentos das imagens e aplicação de máscaras na região da bolha alongada (fase gasosa).

4.2.4.1 Aquisição da velocidade de translação da bolha alongada

Como mencionado anteriormente, um sistema de interruptores de feixe foi utilizado para de medir a velocidade de translação da bolha alongada de

maneira a detectar a passagem do pistão de líquido. Este mesmo sistema foi utilizado na dissertação de Fonseca Junior (2009), Laurindo (2012) e Fernandes (2017). Uma discussão detalhada sobre o funcionamento deste sensor pode ser encontrada nestes trabalhos.

Os interruptores de feixe, ou *photogates*, foram posicionados a aproximadamente 350 diâmetros da entrada da seção de testes. Estes, consistem em um conjunto emissor/detector fotossensível de um feixe de radiação infravermelha, que emite um sinal em voltagem quando o feixe é interrompido. A Figura 4.11 ilustra esquematicamente a montagem dos sensores utilizados.

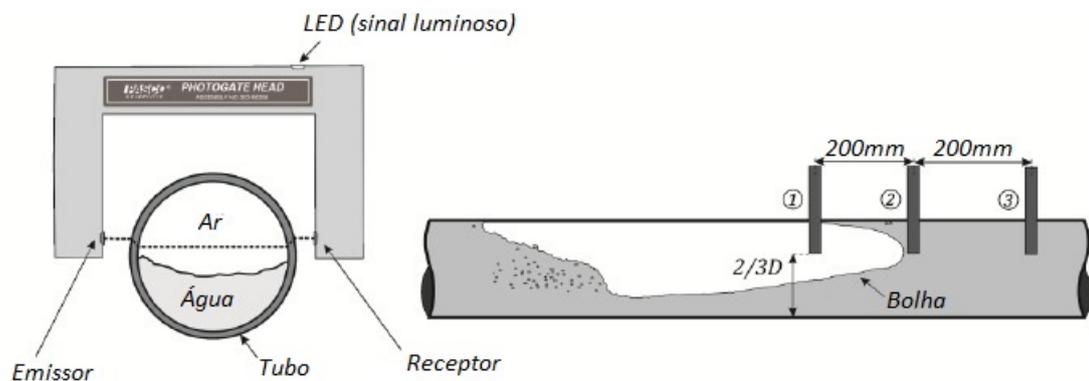


Figura 4.11: Desenho esquemático do sistema de interruptores de feixe. Adaptado de Laurindo (2012)

A detecção da passagem dos pistões de líquido ocorre quando o feixe emitido pelo sensor não percorre o caminho óptico até o receptor na situação na qual a fase líquida ocupa a região da tubulação. Um circuito lógico do tipo "exclusive OR" foi utilizado nos sinais dos sensores 1 e 2 a fim de gerar um pulso típico cada vez que a frente da bolha alongada atravessasse a região entre os sensores. Conhecendo a distância entre os *photogates*, neste caso 200mm, e medindo o intervalo de tempo de duração deste pulso com o contador interno da placa de aquisição, é possível então obter a velocidade de translação da bolha de gás. De posse da velocidade calculada, com os sinais obtidos dos sensores 1 e 2, o terceiro sensor dispara um sinal para o início da aquisição da técnica *SPIV*. Todo o fluxo de sinais é controlado através de um algoritmo desenvolvido no *software* LabView.

Para minimizar o ruído gerado pelas bolhas dispersas, presentes no pistão de líquido, um filtro digital foi utilizado. Após a aquisição, foram considerado como dados espúrios, as velocidades de translação que variassem mais de 3 unidades de desvios padrão, por não representarem o fenômeno estudado. Ao

final, foram utilizados 400 dados, considerados válidos, para cada um dos três casos investigados. Os resultados deste procedimento serão explorados na seção 5.1

Para um melhor detalhamento sobre a utilização de sistemas de interruptores de feixe no cálculo de estatísticas em escoamento intermitente, o trabalho Laurindo (2012) é indicado.

4.2.4.2

Aquisição e processamento das imagens

Com a frequência de aquisição de $400Hz$, foram obtidos, a cada rodada, 220 pares de imagens em sequência, para cada câmera, totalizando 880 imagens por rodada. Um interruptor de feixes foi utilizado como *trigger* para o início de aquisição das imagens. Este, foi posicionado a uma distância conhecida da região de medição. Quando o nariz da bolha chegava no interruptor de feixe, um sinal para início de aquisição era enviado.

Como a velocidade de translação da bolha pode variar, foi preciso, manualmente, determinar a posição do nariz da bolha após cada rodada. Assim, uma rodada só era considerada válida se houvesse ao menos 80 imagens para o pistão de líquido e 80 para a região de filme líquido.

Dada a frequência de aquisição, o intervalo de tempo entre os campos de velocidade medidos era de $2,5ms$. Assim, de acordo com a velocidade de translação da bolha do caso estudado, medida pelos dois primeiros interruptores de feixe, foi possível determinar a distância entre os campos de velocidade medidos, como descrito por Fernandes (2017).

Foi utilizado o *software* Insight 4G, da TSI, para o processamento das imagens e para a reconstrução dos três componentes dos campos de velocidade. A técnica de correlação cruzada foi executada com janelas de interrogação iniciais quadradas de 64 pixels, seguidas de janelas de 32 pixels, com 50% de sobreposição, gerando uma malha com resolução e espaçamento de $0,61mm$ entre os vetores, com mais de 3700 vetores de velocidade medidos na fase líquida, em cada seção transversal.

4.2.5

Máscara na região do filme líquido

O objetivo deste trabalho é contribuir para o esclarecimento do comportamento da fase líquida no escoamento turbulento de gás e líquido intermitente em tubulação horizontal. Com esta finalidade, campos médios de velocidade da fase líquida, em regiões de interesse na célula unitária foram medidos. Desta

forma, foi necessário determinar, nas imagens capturadas, a área ocupada pela fase líquida.

No trabalho de Fernandes (2017) foi utilizado um método baseado na intensidade dos pixels para gerar máscaras automaticamente, o que funcionou bem devido a alta viscosidade da solução utilizada, gerando um escoamento laminar e com bolhas bem comportadas. Entretanto, no presente trabalho, o escoamento intermitente turbulento de água e ar ocasionou numa variação considerável na posição ocupada pela bolha de gás, na seção transversal, observada nas imagens instantâneas capturadas. Esta variação, ocorreu principalmente nas imagens próximas ao nariz da bolha.

Logo, foi necessário o desenvolvimento de um código para gerar uma máscara que, em cada imagem instantânea, destacasse apenas região ocupada pela fase líquida, gerando assim, uma máscara ligeiramente maior do que uma máscara média.

Primeiramente, foi preciso selecionar manualmente a borda de diversas imagens da bolha alongada, como visto nas Figura 4.12 (a) e (b). Gerando assim, uma máscara para uma imagem instantânea. O conjunto de máscaras instantâneas, juntas, resultam numa máscara final média (Figura 4.13. As máscaras médias foram feitas a partir de 50 máscaras instantâneas.

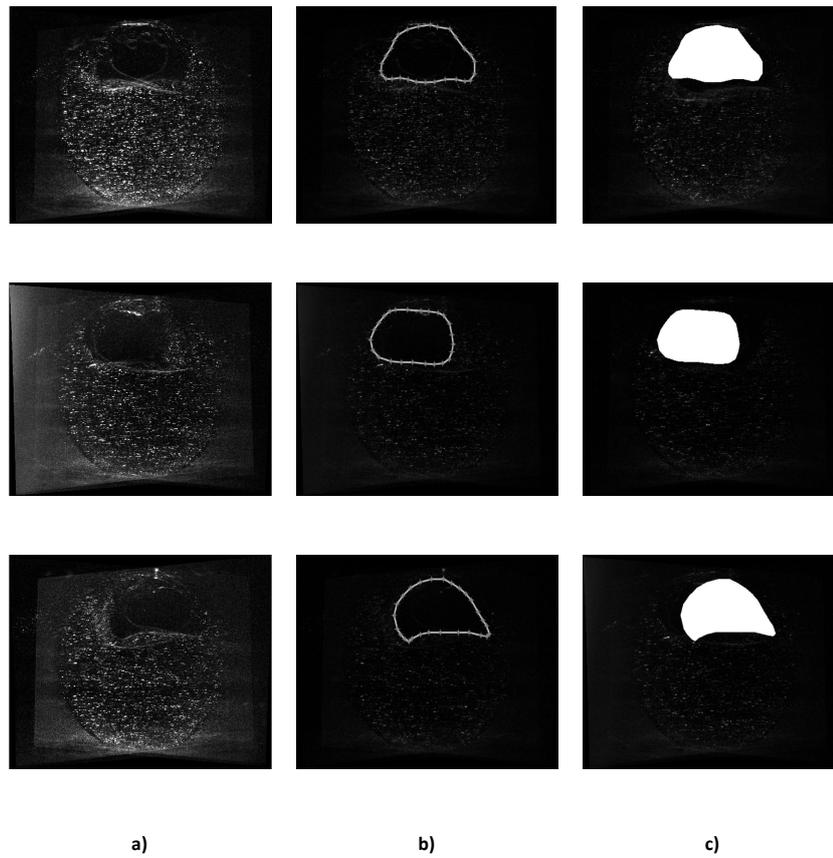


Figura 4.12: **a)** Diferentes posições da bolha de gás para diferentes células e em uma mesma posição relativa ao nariz da bolha; **b)** Procedimento manual de detecção de borda; **c)** Máscara instantânea gerada

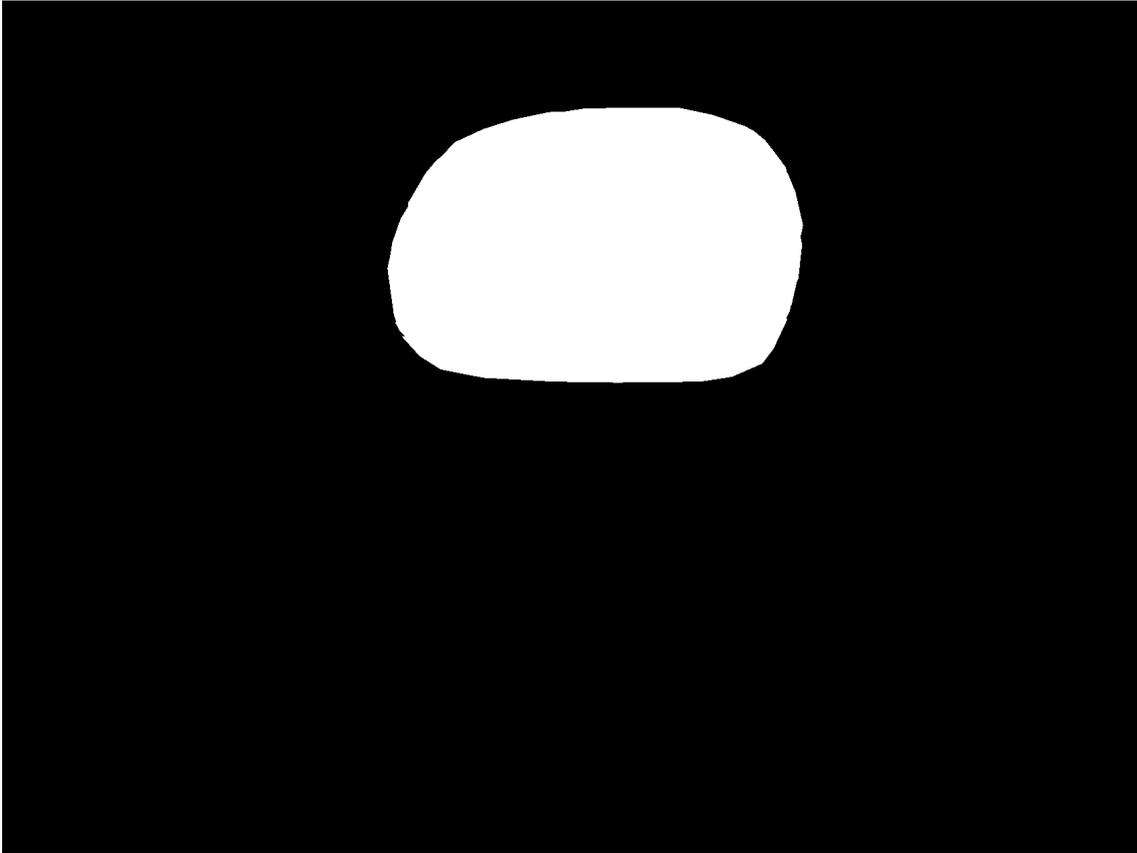


Figura 4.13: Máscara final gerada para o processamento de imagens na região do filme líquido

5 Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais para o escoamento bifásico intermitente em tubo horizontal, obtidos através das técnicas descritas nos capítulos anteriores. Primeiramente, é realizada uma comparação da distribuição estatística da velocidade de deslocamento das bolhas de gás com resultados da literatura. Através desta comparação, é possível validar os dados obtidos e comprovar que, os resultados representam a dinâmica do escoamento e independem de influências expressivas da montagem experimental. Em seguida, são apresentados os resultados para o escoamento monofásico, utilizados na validação da técnica *SPIV*. Finalmente, são apresentados os resultados principais do trabalho voltados para os campos de velocidade na fase líquida do escoamento bifásico intermitente.

Na apresentação dos resultados será utilizado o sistema de referências indicado na Figura 5.1. Como pode ser observado, a direção z aponta na direção na direção principal do escoamento, a direção y é paralela à aceleração da gravidade, enquanto a direção x é ortogonal às direções y e z .

A figura apresenta, também, a convenção de sinais utilizada para identificar o tempo de passagem da bolha medido em relação ao nariz da bolha.

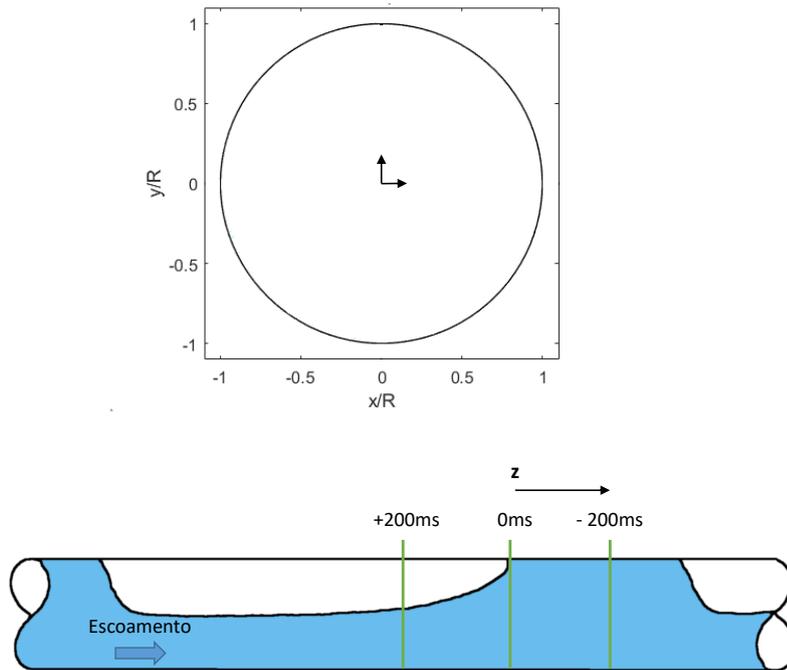


Figura 5.1: Referencial adotado na apresentação dos resultados

5.1

Velocidade de translação da bolha

Conforme mostrado anteriormente, no Capítulo 4, os pontos de operação selecionados para a investigação concentram-se na região de bolha alongada no mapa de padrão de escoamento de Mandhane et al. (1974). Foram analisadas três velocidades superficiais de líquido ($j_L = 0,3, 0,4, 0,5 \text{ m/s}$), mantendo-se fixa uma velocidade superficial de gás ($j_G = 0,5 \text{ m/s}$), conforme exposto na Tabela 4.1.

A velocidade de translação da bolha de gás foi medida utilizando os interruptores de feixe descritos na seção 2.5. Esta informação, além de servir como validação da seção de testes, será utilizada mais adiante na apresentação dos resultados da estrutura do escoamento.

Os resultados obtidos para a velocidade de translação da bolha são apresentados na Figura 5.2 para os três casos estudados. Como pode ser observado, a distribuição de velocidades medidas pode ser representada razoavelmente por uma distribuição normal. Em cada caso, a velocidade de translação da bolha alongada, u_b , foi determinada por, ao menos, 400 medidas instantâneas de ve-

locidade, obtidas através do sistema de interruptores de feixe. Os resultados são ilustrados na Tabela 5.1, onde os números de Froude e Reynolds da mistura foram calculados com base na velocidade de mistura j_m .

Existem diversos trabalhos na literatura que buscam correlacionar as medidas de velocidade de translação da bolha de gás com a velocidade da mistura, dentre estes o de Hurlburt e Hanratty (2002). Conforme visto na equação 3-16, estes autores apresentaram três expressões, baseadas na relação entre forças de inércia e gravitacionais, representadas pelo número de Froude.

Para todos os casos do presente estudo, efeitos gravitacionais são consideráveis em relação aos efeitos de inércia, sendo o número de Froude da mistura menor que 2 para os três casos estudados. A velocidade de translação da bolha de gás para os três casos, pode ser representada, portanto, de acordo com Hurlburt e Hanratty (2002), por apenas uma equação. A comparação entre tais dados da literatura e os resultados obtidos é ilustrada na Figura 5.3 é considerada excelente. Com baixas velocidades de mistura, j_m , ou seja, $Fr_m < 2$, os efeitos gravitacionais são dominantes.

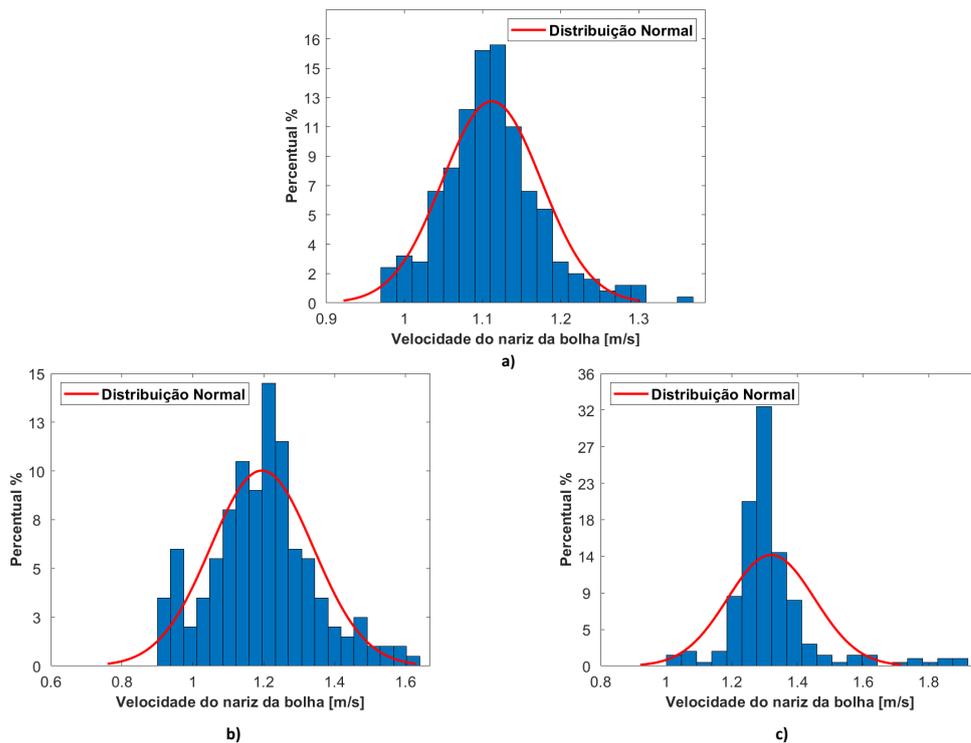


Figura 5.2: Histograma de velocidade de translação do nariz da bolha **a)** Caso 1 ($j_L = 0,3 \text{ (m/s)}$ e $j_G = 0,5 \text{ (m/s)}$); **b)** Caso 2 ($j_L = 0,4 \text{ (m/s)}$ e $j_G = 0,5 \text{ (m/s)}$); **c)** Caso 3 ($j_L = 0,5 \text{ (m/s)}$ e $j_G = 0,5 \text{ (m/s)}$)

Tabela 5.1: Número de Froude e medidas de velocidade de translação da bolha de gás

Caso	j_m	Fr_m	Re_m	u_b
1	0,8 (m/s)	1,28	32000	1,11 (m/s)
2	0,9 (m/s)	1,44	36000	1,24 (m/s)
3	1,0 (m/s)	1,60	40000	1,32 (m/s)

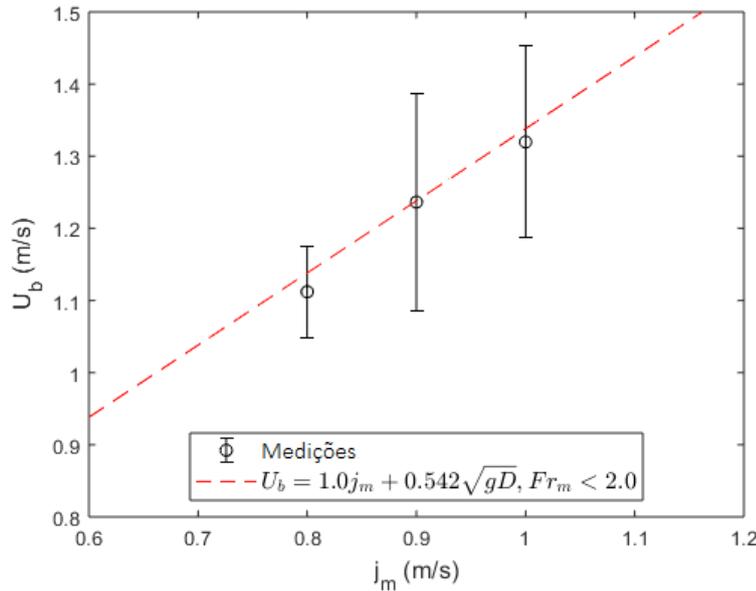


Figura 5.3: Comparação entre medidas de velocidade de translação da bolha de gás e a expressão apresentada por Hurlburt e Hanratty (2002)

5.2

Resultados de validação do escoamento monofásico

Na seção 4.2.3, o processo de correção da posição do centro da malha de medição foi apresentado como sendo baseado na posição do perfil parabólico do escoamento laminar, hidrodinamicamente desenvolvido no tubo. O perfil parabólico obtido neste processo foi também utilizado como forma de validação da técnica *SPIV*. Para isso, os resultados medidos foram comparados com a solução analítica parabólica do perfil laminar desenvolvido. A comparação entre estes perfis é apresentada na Figura 5.4. A excelente concordância entre estes perfis é atestada pelo coeficiente de correlação $R^2 = 0,99$, e erro quadrático médio abaixo de 2%

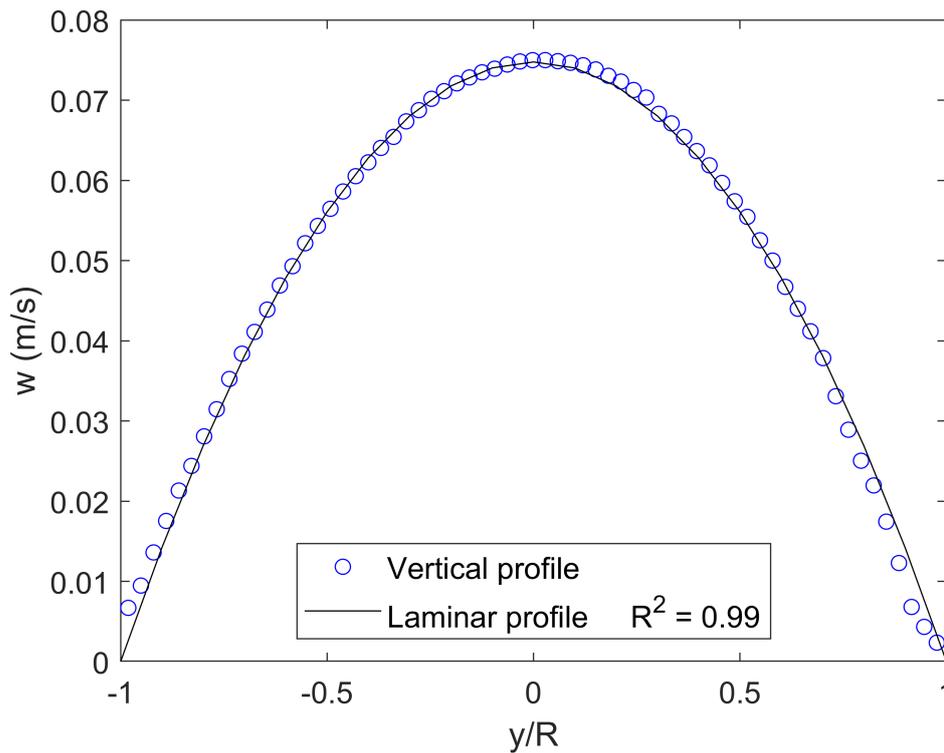


Figura 5.4: Comparação entre o perfil médio de velocidade medido e o perfil teórico para escoamento laminar hidrodinamicamente desenvolvido

5.3

Resultados dos campos de velocidade para o Caso 1

Nesta seção, serão apresentados os dados para os três componentes de velocidade obtidos pela técnica *SPIV* na região do pistão e filme de líquido. Na apresentação dos campos de velocidade optou-se por descrever em detalhes os resultados obtidos para o Caso 1 ($j_L = 0,3 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$), pois verificou-se que os resultados para as três condições de operação testadas são qualitativamente similares. Os resultados para os Casos 2 e 3 são apresentados no Apêndice. A comparação entre as três condições de operação será apresentada em termos de perfis de velocidade, onde as diferenças se tornam mais notáveis.

A Figura 5.5 auxilia na visualização da posição dos planos onde foram realizadas as medições de campos de velocidade pela técnica *SPIV*. Os planos na região do pistão de líquido são denominados (a), (b), (c) e (d), correspondendo aos tempos de captura das medidas antes da chegada do nariz da bolha no plano de medição, respectivamente, -20 ms , $-12,5 \text{ ms}$, $-7,5 \text{ ms}$ e $-2,5 \text{ ms}$. Os planos (e), (f), (g) e (h), situam-se na região do filme líquido correspon-

dendo a tempos de captura das medidas após a passagem do nariz da bolha pelo plano de medição de, respectivamente, $+2,5\text{ ms}$, $+7,5\text{ ms}$, $+12,5\text{ ms}$ e $+20\text{ ms}$.

Estes intervalos de tempo, mencionados no parágrafo anterior são aqueles necessários para que o nariz da bolha se desloque e ultrapasse a posição do plano laser de medição. No presente trabalho, as velocidades de translação das bolhas de gás medidas para cada condição de operação foram consideradas como sendo as velocidades das células unitárias. Tais velocidades foram utilizadas, então, para transformar o tempo entre cada aquisição ($2,5\text{ ms}$) em espaço. Esta conversão é baseada na hipótese que as grandezas médias de interesse em posições específicas em relação à bolha são invariantes para as mesmas condições operacionais do experimento. Esta hipótese é comumente utilizada no estudo de escoamentos monofásicos desenvolvidos turbulentos, para transformar informações temporais em espaciais, sendo conhecida como hipótese de Taylor (*frozen turbulence hypothesis*). Por exemplo, para as condições de operação correspondentes ao Caso 1, onde a velocidade de translação da bolha foi determinada como sendo igual a $1,11\text{ m/s}$, as posições correspondentes aos planos (a), (b), (c), (d), (e) (f), (g) e (h) na Figura 5.5 são, respectivamente $(-0,56D)$, $(-0,35D)$, $(-0,21D)$, $(-0,07D)$, $(+0,07D)$, $(+0,21D)$, $(+0,35D)$ e $(+0,56D)$. De acordo com a convenção apresentada na Figura 5.1, valores negativos para o tempo ou posição do plano referem-se a regiões a jusante do nariz da bolha e valores positivos a montante do nariz da bolha.

Como visto no capítulo 4, cada resultado para os campos de velocidade foi obtidos a partir da média de campos instantâneos de velocidade medidos de 1500 eventos independentes de passagem de bolhas.

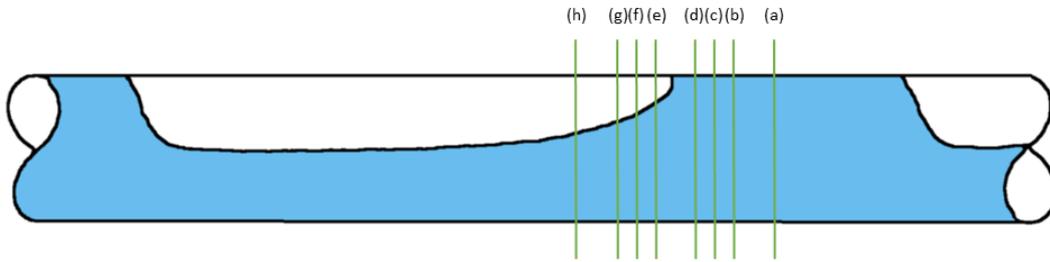


Figura 5.5: Representação esquemática da localização dos planos de medição de campos de velocidade em relação à posição do nariz da bolha para o Caso 1: **a)** -20 ms ($-0,56D$), **b)** $-12,5 \text{ ms}$ ($-0,35D$), **c)** $-7,5 \text{ ms}$ ($-0,21D$), **d)** $-2,5 \text{ ms}$ ($-0,07D$), **e)** $+2,5 \text{ ms}$ ($+0,07D$), **f)** $+7,5 \text{ ms}$ ($+0,21D$), **g)** $+12,5 \text{ ms}$ ($+0,35D$) e **h)** $+20 \text{ ms}$ ($+0,56D$)

5.3.1

Resultados para o campo de velocidade no pistão de líquido

Na Figura 5.6 são apresentados os campos de velocidade medidos para as condições de operação do Caso 1 na região do pistão de líquido. Na figura, o componente axial da velocidade, w , é representado em cores referenciadas à escala indicada na figura. Os componentes da velocidade no plano transversal, u e v , são representados por vetores.

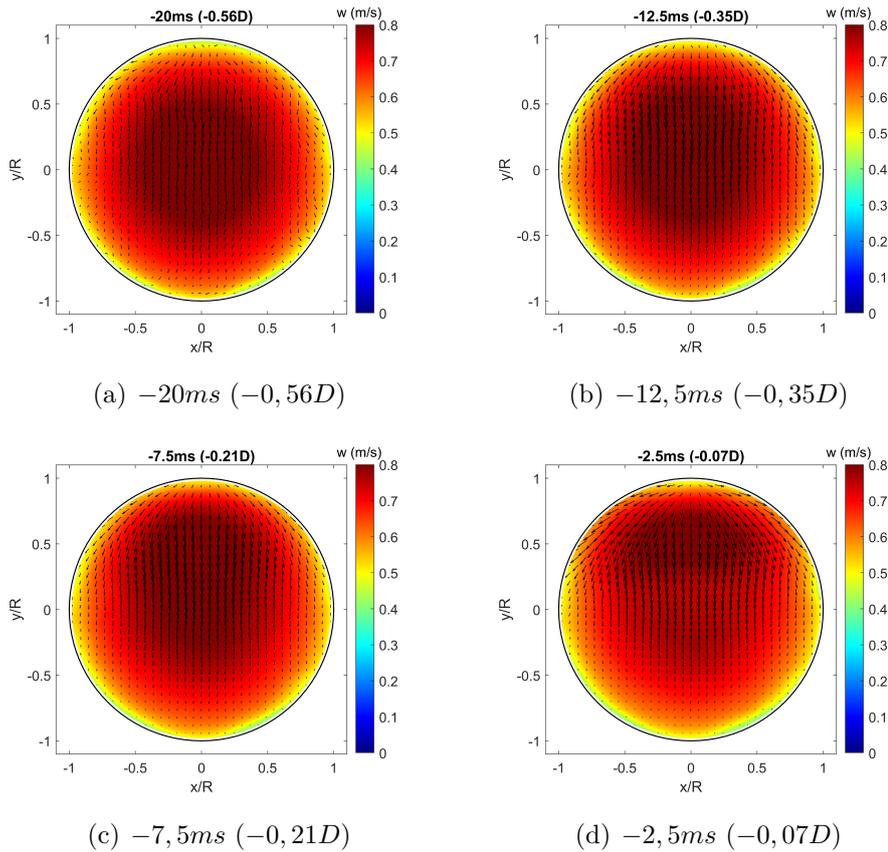


Figura 5.6: Campos de velocidade na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3 m/s$) e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.

Uma observação do campo de velocidade apresentado na Figura 5.6 a) mostra que o perfil de velocidade axial do líquido na posição $0,56D$ a jusante do nariz da bolha apresenta um comportamento quase que perfeitamente axi-simétrico. Nota-se, uma região de velocidade elevada e valor aproximadamente constante ocupando a região central da seção reta do tubo. Há uma queda forte da velocidade em direção à parede do tubo. Este comportamento, é típico de um perfil de velocidade turbulento desenvolvido em escoamento em tubo. Mais adiante, serão apresentados perfis de velocidade axial, extraídos destes dados na região do plano diametral vertical, que irão corroborar esta observação. Nota-se ainda, consultando a escala de cores, que a magnitude da velocidade axial máxima é da ordem de $0,8 m/s$, valor abaixo da velocidade de translação da bolha que, para o Caso 1 em questão, é de $1,11 m/s$. Os componentes da velocidade no plano são muito pequenos, como indicam os vetores velocidade apresentados na figura.

À medida que os planos de medição se aproximam da posição do nariz da bolha, Figura 5.6 (b) e (c), é possível perceber uma tendência de deslocamento

da região de máxima velocidade para a parte superior da seção reta do tubo. O aumento da velocidade nesta região, está associado à posição mais próxima do nariz da bolha, que se encontra na parte superior do tubo devido às forças de empuxo. Os componentes de velocidade transversais u e v , se acentuam dando início a um escoamento secundário na seção reta do escoamento. A influência do nariz da bolha se torna evidente no campo de velocidade apresentado na Figura 5.6 (d), capturado a apenas, aproximadamente, 3 milímetros da posição do nariz da bolha ($-0,07D$). De fato, a região de velocidade axial máxima se reduz, concentrando-se numa posição intermediária entre o centro do tubo e a parede superior do tubo. Escoamentos secundários formam-se na seção transversal como resultado do escoamento descendente imposto pelo nariz da bolha, movendo-se mais rapidamente que a velocidade média do fluido.

A evolução dos componentes de velocidade nos planos de medição pode ser melhor avaliada com o auxílio das Figuras 5.7 e 5.8. Nestas figuras, são apresentados os componentes horizontal e vertical da velocidade nos mesmos planos investigados na região do pistão que acabaram de ser analisados.

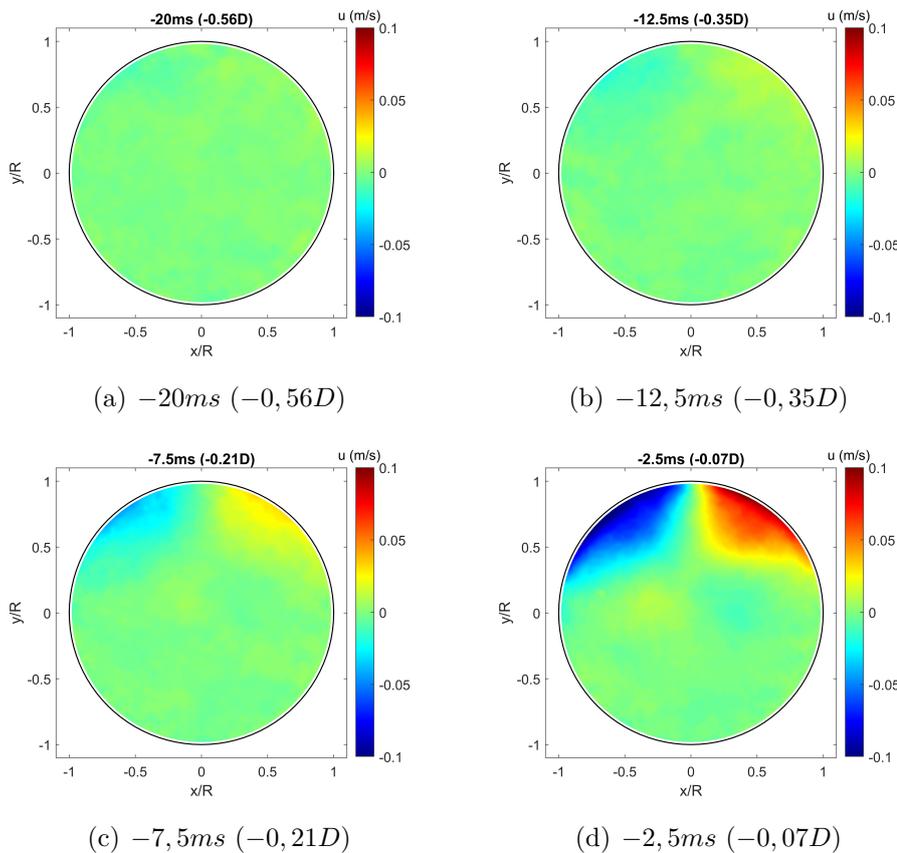


Figura 5.7: Campos de velocidade horizontal, u , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$).

Uma observação das magnitudes do componente horizontal da veloci-

dade, u , apresentadas na Figura 5.7 indica valores praticamente nulos em toda a seção reta do tubo, para todas as posições axiais indicadas. Apenas na posição mais próxima ao nariz da bolha, Figura 5.7 (d), nota-se a formação de movimento lateral do centro para as paredes do tubo, na região superior do tubo. Este movimento, é compatível com o efeito de aproximação da bolha mais rápida que o escoamento médio do líquido.

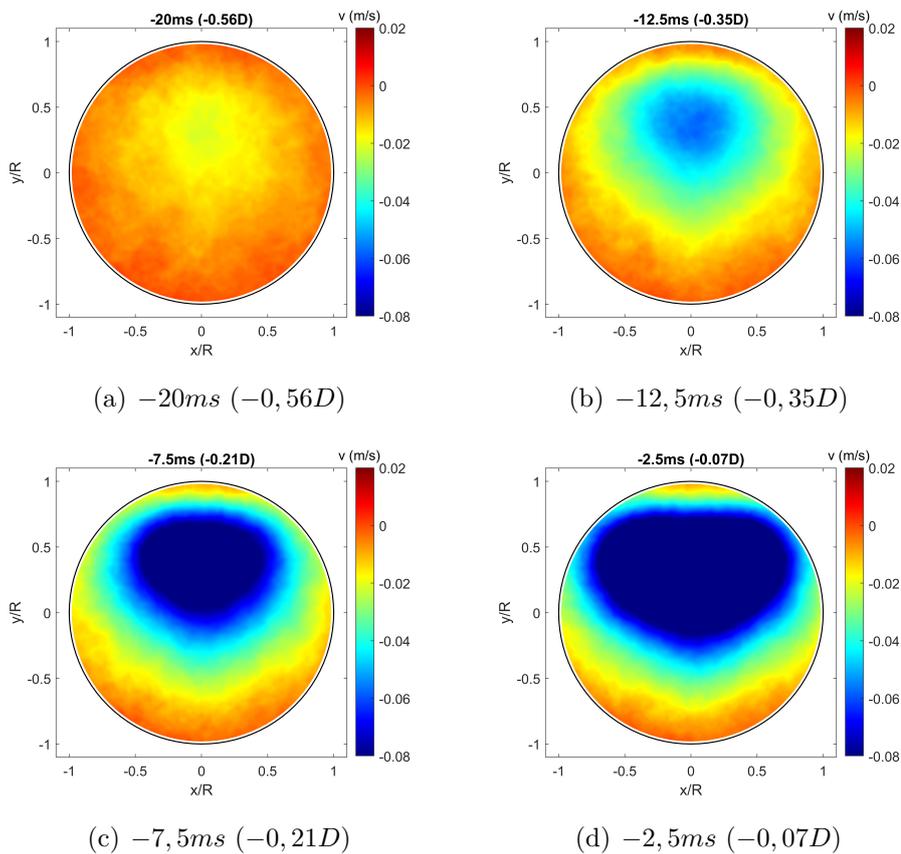


Figura 5.8: Campos de velocidade vertical, v , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$).

Já para o caso do componente vertical do escoamento, v , apresentado na Figura 5.8, nota-se uma mudança mais intensa na magnitude desta componente da velocidade, à medida que regiões mais próximas ao nariz da bolha são analisadas. De fato, o componente vertical é praticamente nulo para a posição $-0,56D$, aumentando em magnitude e direcionando-se para baixo à medida que posições mais próximas ao nariz da bolha são observadas. Os fortes valores negativos do componente vertical da velocidade, observados na Figura 5.8, são o resultado da influência da bolha mais rápida empurrando fluido para baixo.

5.3.2

Resultados para os campos de velocidade no filme

A seguir, serão apresentados os resultados para os campos de velocidade obtidos na região inicial do filme de líquido, próxima ao nariz da bolha. Os campos de velocidade são apresentados na Figura 5.9. Na figura, como anteriormente, a magnitude do componente axial da velocidade, w , é apresentada associada à escala de cores indicada, enquanto os componentes no plano são apresentados na forma de vetores. É importante mencionar que as regiões em branco nas figuras não representam a forma da bolha de gás, mas sim a máscara utilizada para o processamento das informações de velocidade do líquido utilizando a técnica *SPIV*. Devido às oscilações observadas na posição de cada bolha da série de 1500 utilizada na construção do campo médio de velocidade, o processamento de imagens, descrito no Capítulo 4, selecionou apenas regiões onde a fase líquida era presente, em cada imagem, como máscara instantânea. A união de tais regiões gerou a área final da máscara, sendo essa, obviamente, maior que a área média ocupada pelo gás.

O campo de velocidade mostrado na Figura 5.9 (a), mostra o escoamento em uma região muito próxima ao nariz da bolha, mas já adentrando a região do filme. A região onde a velocidade axial assume os maiores valores situa-se logo abaixo da posição da bolha, mas apresenta menor magnitude do que em regiões a jusante da bolha. A forma de um escoamento com perfil achatado, típico de escoamentos turbulentos, é ainda observada. Para posições mais a montante do nariz, mais no interior do filme, nota-se que o escoamento axial perde progressivamente intensidade.

A formação dos movimentos circulatórios, na região de entrada do filme, pode ser observada pela análise dos componentes horizontal e vertical da velocidade em cada plano. Esta informação é apresentada nas Figuras 5.10 e 5.11

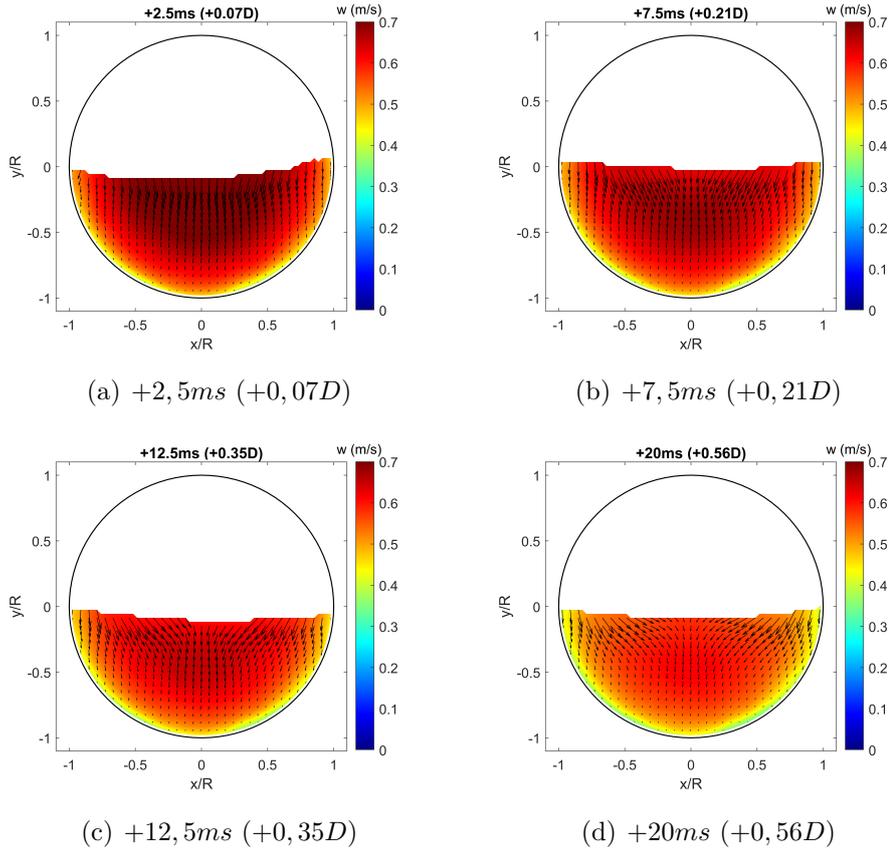


Figura 5.9: Campos de velocidade na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.

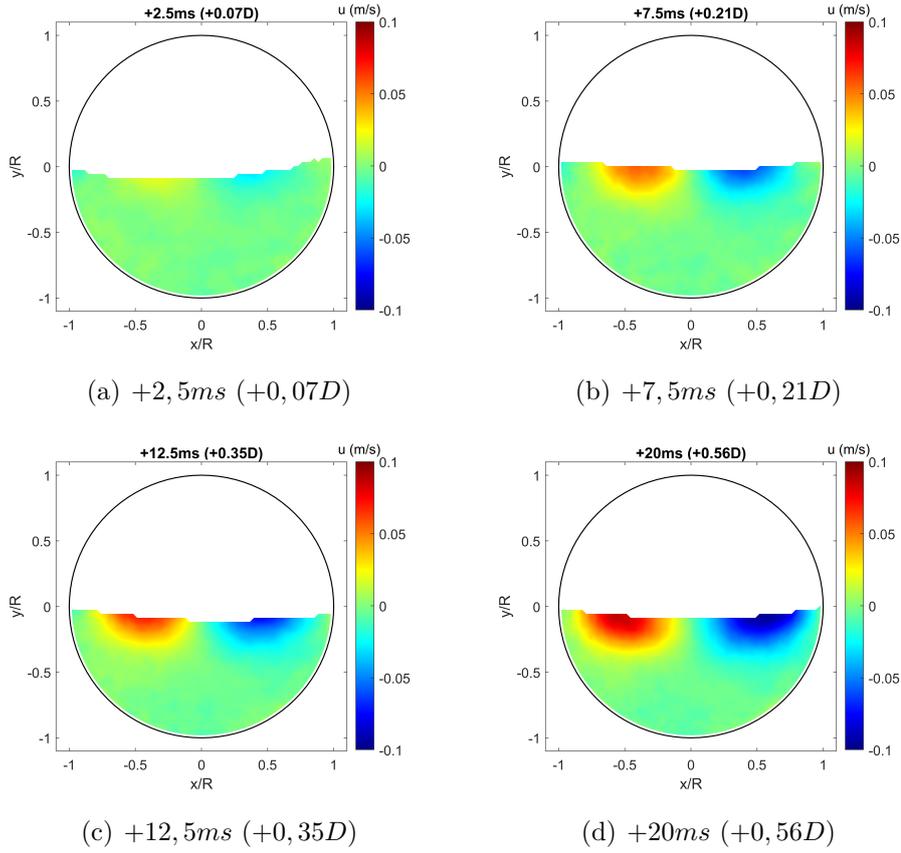


Figura 5.10: Campos de velocidade horizontal, u , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$).

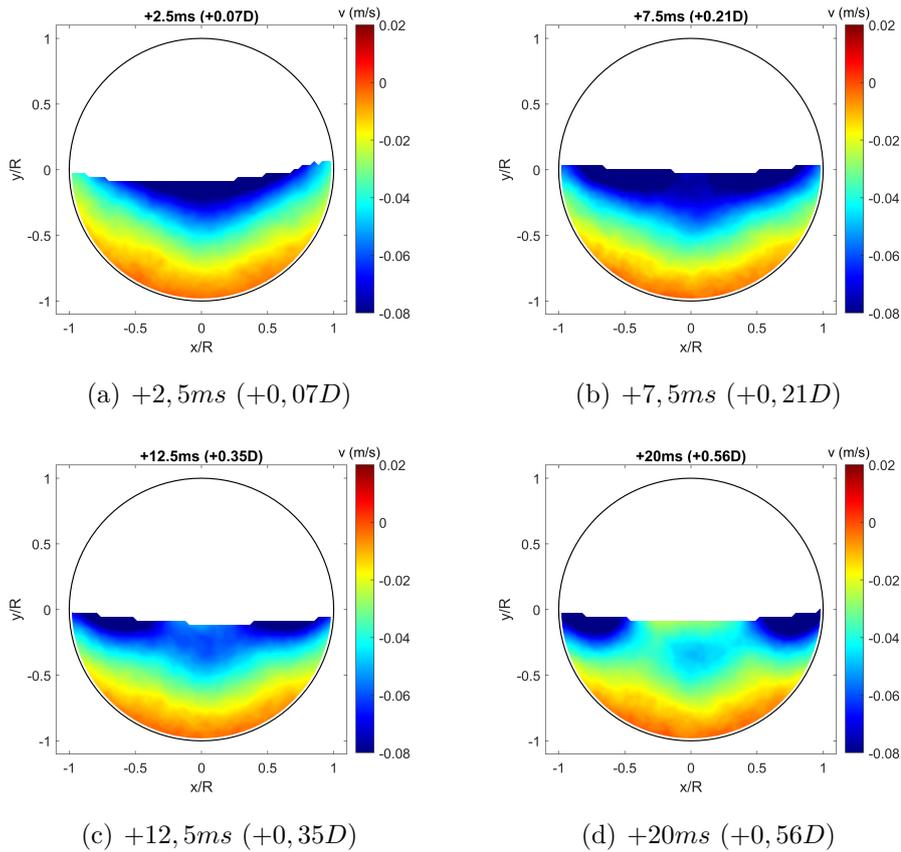


Figura 5.11: Campos de velocidade vertical, v , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 1 ($j_L = 0,3 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$).

O componente horizontal da velocidade é virtualmente nulo em toda a seção ocupada pelo filme no plano logo a montante do nariz da bolha, como indicado na Figura 5.10 (a). Para planos localizados mais no interior do filme, nota-se a formação de estruturas bem definidas, formadas por regiões de velocidade horizontal direcionadas da parede para o centro do tubo, confinadas na vizinhança da interface entre o líquido e a bolha de gás. Estas estruturas se intensificam para planos mais a montante do nariz da bolha, como pode ser verificado pela análise das Figuras 5.10 (b), (c) e (d).

Logo, a montante do nariz da bolha de gás, o componente vertical do vetor velocidade é negativo (Figura 5.11(a)), ocupando toda a região central da tubulação e indicando um crescimento da área ocupada pela bolha, na mesma direção da força gravitacional. Este é o escoamento já comentado, induzido pela passagem da bolha mais rápida que o escoamento médio do líquido.

A partir da análise conjunta das informações das Figuras 5.10 e 5.11, é possível observar padrões interessantes no escoamento secundários. A análise sequencial indica que as regiões de velocidade vertical negativa se deslocam do centro da tubulação para regiões próximas à parede do tubo, ainda logo

abaixo da bolha. A composição deste componente vertical descendente com o componente horizontal já descrita, parece indicar a presença de um movimento circular de líquido no sentido horário, do lado direito da tubulação ($x > 0$ no sistema de referências adotado) e anti horário do lado esquerdo da tubulação ($x < 0$). A mesma tendência foi observada no trabalho de Fernandes et al. (2018) e nas simulações numéricas de Febres et al. (2010). Imagens desse padrão, de ambos os trabalhos estão ilustrados nas Figuras 3.4 e 3.5.

5.3.3

Apresentação conjunta dos campos de velocidade no pistão e filme de líquido

Para facilitar a visualização dos escoamentos, figuras com campos dos componentes horizontal e vertical da velocidade, já apresentados acima para a regiões do pistão e filme líquido, são apresentados em conjunto na Figura 5.12, para as condições operacionais do Caso 1.

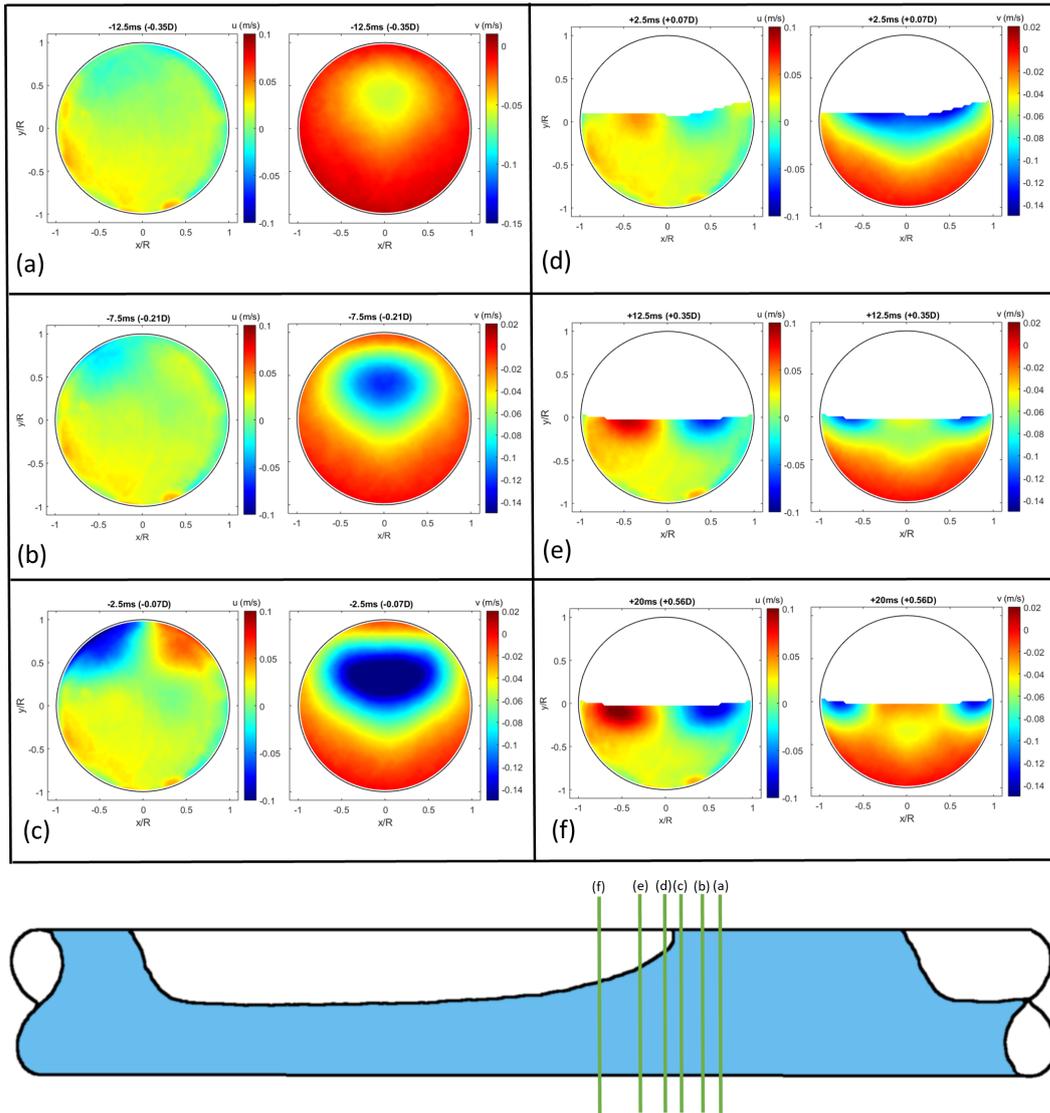


Figura 5.12: Componentes médios de velocidade u e v em diferentes posições em relação ao nariz da bolha alongada : **a)** $-12,5\text{ms } (-0,35D)$, **b)** $-7,5\text{ms } (-0,21D)$, **c)** $-2,5\text{ms } (-0,07D)$, **d)** $+2,5\text{ms } (+0,07D)$, **e)** $+12,5\text{ms } (+0,35D)$, **f)** $+20\text{ms } (+0,56D)$

5.4 Reconstrução tri-dimensional do escoamento em torno da bolha

Como já comentado, os campos médios de velocidade apresentados até o momento foram determinados a partir de médias obtidas de campos instantâneos de velocidade medidos, para um mesmo plano de interesse, em 1500 bolhas independentes. No entanto, como foram utilizadas nas medições câmeras e lasers de alta frequência, estavam disponíveis para análise, informações de velocidade espaçadas no tempo com intervalos da ordem de apenas $2,5\text{ms}$, para cada uma das 1500 bolhas medidas. Assim, foi possível reconstruir a estrutura tri-dimensional média do escoamento ao redor do nariz da bolha. Para

isso, como feito anteriormente, a velocidade de translação da bolha foi usada para converter informações temporais em espaciais.

A Figura 5.13, apresenta a reconstrução tri-dimensional da estrutura do escoamento ao redor do nariz da bolha para as condições operacionais do Caso 1. A iso-superfície amarela, representa a máscara utilizada no processamento dos campos de velocidade, representando bem superfície da bolha de gás. O componente axial de velocidade, w , é apresentado em três planos, onde as cores são associadas à escala mostrada na figura. A iso-superfície azul, representa a região onde o componente da velocidade vertical média é negativo, sendo seu valor $-0,05 m/s$.

Uma observação da Figura 5.13 mostra que a intensidade do escoamento axial decresce para a região do filme, quando comparada à região do pistão. A região de velocidade negativa, induzida pela passagem da bolha mais rápida que o escoamento médio do líquido a jusante no pistão, é claramente observada no nariz da bolha com a ajuda da iso-superfície azul. Nota-se, que este escoamento descendente se desloca da região do nariz da bolha, ocupando duas regiões simetricamente posicionadas em relação ao eixo do tubo, próximo às paredes. Conforme já descrito, uma estrutura similar do escoamento foi observada por Fernandes et al. (2018).

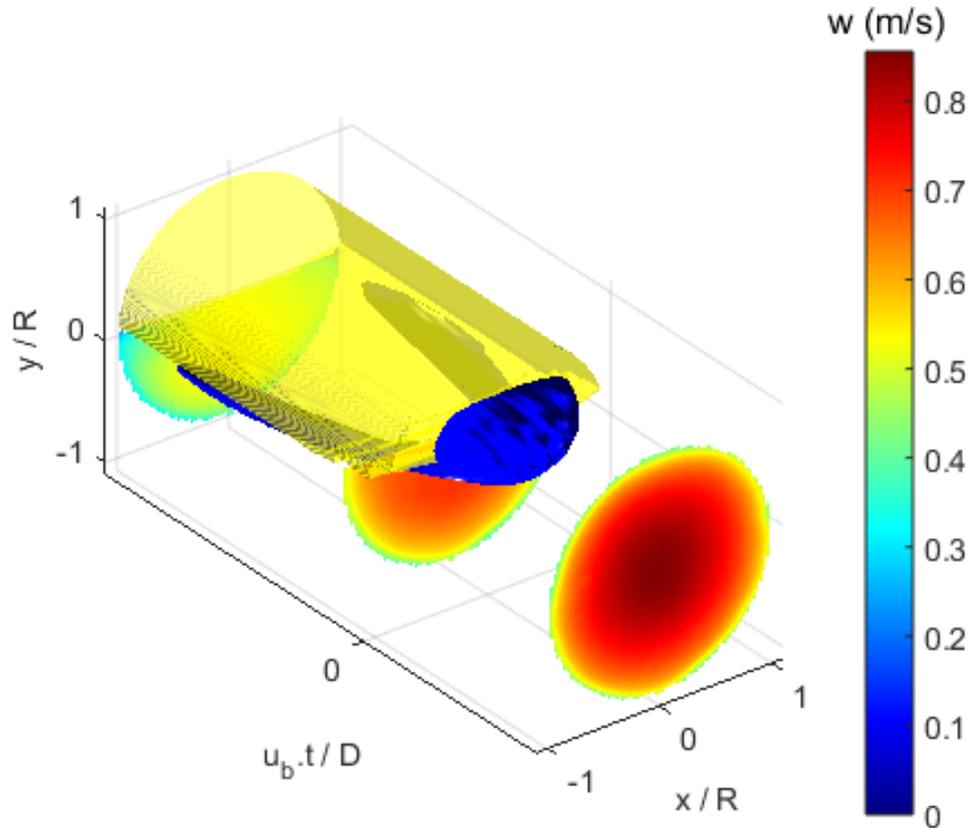


Figura 5.13: Reconstrução tri-dimensional do escoamento ao redor do nariz da bolha para as condições de operação do Caso 1. A Iso-superfície amarela representa a máscara em torno da bolha alongada. Componente axial da velocidade, w , representada por cores nos planos transversais. A Iso-superfície azul representa região onde a componente média vertical da velocidade do líquido, v , tem valor $-0,05 \text{ m/s}$.

5.5

Perfis de velocidade no pistão e filme de líquido

Nesta seção, são apresentados perfis de velocidade axial do líquido nas regiões do pistão e do filme, na vizinhança do nariz da bolha de gás. Estes, foram extraídos dos campos de velocidade já apresentados, ao longo da linha vertical, passando pelo plano diametral, ou seja, em $x = 0$. Na apresentação dos campos de velocidade, apenas os resultados referentes ao Caso 1 foram apresentados e discutidos. Devido à semelhança qualitativa observadas entre as três condições operacionais, os resultados dos Casos 2 e 3 foram deslocados para o Apêndice para facilitar a leitura do texto. Para a apresentação dos perfis de velocidade, no entanto, resultados das três condições operacionais

são apresentados, respectivamente nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16

A observação dos perfis de velocidade mostra, como esperado, a grande influência da presença da bolha de gás na velocidade do líquido. Observando os resultados para o Caso 1, mostrados na Figura 5.14, observa-se que o perfil de velocidade axial do líquido no pistão na posição axial mais a jusante do nariz da bolha ($-0,35D$), apresenta uma forma típica de perfis turbulentos em dutos. De fato, uma região com velocidade axial aproximadamente constante no centro do tubo está presente, com regiões próximas às paredes que apresentam gradientes fortes de velocidade. Nota-se, no entanto, uma discreta assimetria neste perfil de velocidade axial, já como consequência da influência da presença da bolha.

Para as posições axiais, ainda dentro do pistão de líquido, porém mais próximas ao nariz da bolha, observa-se a forte influência da bolha. O perfil situado a apenas $3mm$ a jusante do nariz da bolha ($-0,07D$), apresenta dois pontos de inflexão, com máximos locais aproximadamente nas posições $y/R = 0,5$ e $y/R = -0,4$, e com um mínimo local em $y/R = 0,1$. Como a velocidade de translação da bolha aumenta com o aumento da velocidade superficial do líquido, a deformação do perfil de velocidade imediatamente a jusante do nariz da bolha se amplifica. Este efeito pode ser observado nas Figuras 5.14 e 5.15 onde os perfis de velocidade para os Caso 2 e 3, de maior velocidade superficial de líquido são apresentados. Este efeito também seria provavelmente observado caso a velocidade superficial do gás fosse aumentada, o que produziria também aumento na velocidade da bolha, de acordo com Hurlburt e Hanratty (2002). Este experimento, no entanto, não foi realizado no presente trabalho por limitação de tempo, sedo uma sugestão para futuros trabalhos.

Os perfis de velocidade axial na região do filme de líquido apresentam informações interessantes. Em princípio, parece errada a informação observada que indica que a velocidade na fronteira da bolha é menor que a velocidade no interior do filme. Como a bolha é mais rápida que o escoamento médio seria esperado que a região da interface líquido gás apresentasse o valor mais elevado. Esta mesma observação, de que a velocidade do líquido da interface não é a mais elevada dentro do filme, foi feita no trabalho de Fernandes et al. (2018) para escoamento intermitente laminar. O trabalho anterior de Fonseca Junior (2009) também observou o mesmo comportamento, atribuindo-o a possíveis erros da técnica de medição *PIV* na região da interface, onde reflexões ópticas podem dificultar as medições. Fernandes et al. (2018), no entanto, realizou uma investigação detalhada mostrando que as medidas da técnica *SPIV* utilizada junto à interface, estavam corretas. Fernandes et al.

(2018) justificou o menor valor da velocidade do líquido dentro do filme junto à interface como sendo devido ao movimento da própria interface. De fato, a bolha de gás não se move como um corpo rígido, sendo a tensão cisalhante imposta pelo líquido responsável por retardar a interface, impondo-lhe movimento que é compatibilizado com um escoamento de um sistema de vórtices contra rotativos induzido dentro do gás na bolha.

Outra informação apresentada pelos perfis de velocidade dentro filme, que requer interpretação cuidadosa, diz respeito à aparente desaceleração dos perfis de velocidade para as regiões mais no interior do filme. Os perfis apresentados foram medidos em relação ao referencial do laboratório. Caso o referencial da bolha fosse utilizado, os perfis no filme teriam valor negativo, com magnitude crescente para regiões mais no interior do filme. Neste referencial, o escoamento no filme é um escoamento em canal convergente formado pela crescente área ocupada pela bolha, justificando, portanto, a aceleração espacial dos perfis.

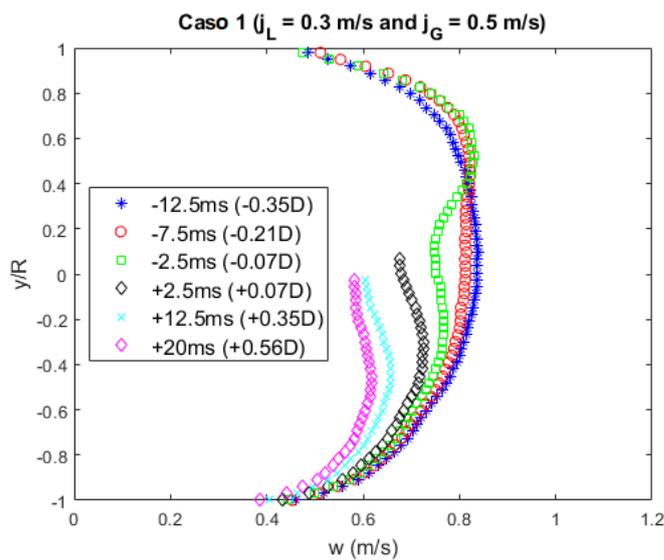


Figura 5.14: Perfil de velocidade em diferentes posições na direção axial

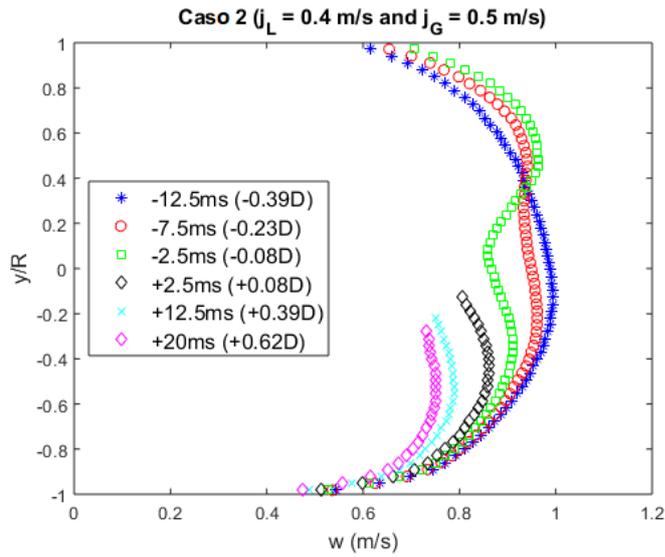


Figura 5.15: Perfil de velocidade em diferentes posições na direção axial

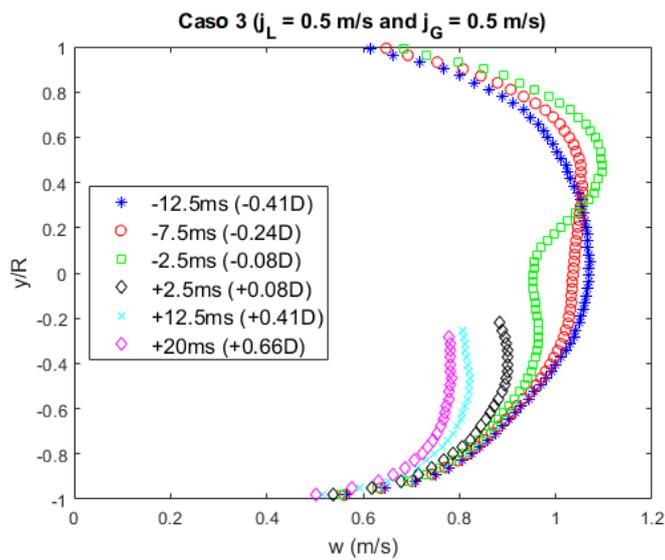


Figura 5.16: Perfil de velocidade em diferentes posições na direção axial

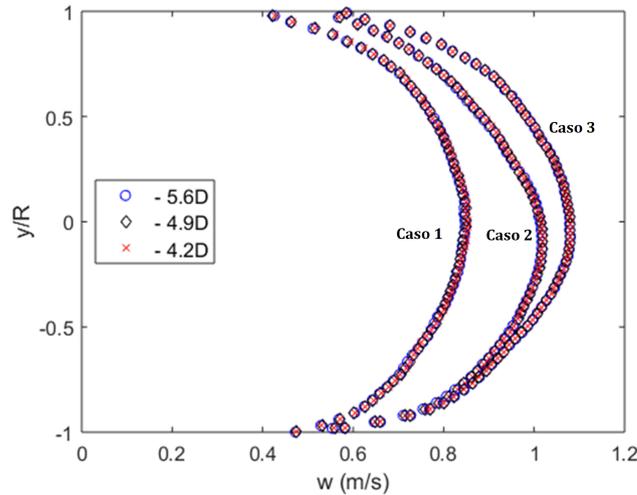


Figura 5.17: Perfil de velocidade em posições afastadas do nariz da bolha

Finalmente, na Figura 5.17, são apresentados perfis de velocidade axial para regiões mais afastadas do nariz da bolha, dentro do pistão de líquido. Nesta figura, é feita uma comparação dos perfis medidos em três posições axiais, $-4,2D$, $-4,9D$ e $-5,6D$, para as três velocidades superficiais de líquido.

Os resultados da Figura 5.17 mostram que, para cada valor da velocidade superficial do líquido estudado, os perfis medidos nas três posições axiais são coincidentes, indicando que, nestas posições no interior do pistão de líquido, não há influência do nariz ou traseira das bolhas que limitam o pistão.

Também é possível observar nos perfis apresentados na figura, uma crescente assimetria nos perfis de velocidade com o aumento da velocidade superficial do líquido (indo do Caso 1 para o Caso 3). Esta assimetria pode ser atribuída ao aumento do número de pequenas bolhas de gás despreendidas da traseira da bolha a jusante, que ocorre com o aumento da velocidade superficial do líquido. Estas bolhas tendem a acumular-se na região superior do tubo, dentro do pistão de líquido, afetando o perfil médio de velocidade axial.

6

Conclusão

O presente trabalho, descreve o comportamento do campo médio dos vetores de velocidade, na fase líquida, em um escoamento de gás e líquido, em tubulação horizontal, no padrão intermitente.

A seção de testes foi composta por uma tubulação de acrílico de 40mm de diâmetro interno e 18m de comprimento ($L/D \approx 450$). Os fluidos de trabalho utilizados foram ar, na fase gás e água, na fase líquida.

Foram medidos os três componentes de campos médios de velocidade na região de líquido através de uma combinação da técnica de *SPIV* e fluorescência induzidas por laser (*LIF*). Com a finalidade de obter perfis de velocidade que possam ser considerados estatisticamente convergidos, 1500 passagens de bolha distintas foram medidas para cada caso. A frequência de aquisição empregada foi de 400Hz. Foram obtidas, a cada rodada, 220 pares de imagens em sequência, para cada câmera, totalizando 880 imagens por rodada. O sistema de interruptores de feixe foi empregado, durante o experimento, como sinal de disparo para a aquisição de imagens da técnica *SPIV*.

A velocidade de translação da bolha de gás foi medida com o sistema de interruptores de feixes, sendo sua média obtida a partir de ao menos 400 aquisições. A velocidade de translação da bolha foi considerada como a velocidade de translação da célula unitária, possibilitando a conversão do intervalo de tempo entre os campos de velocidade medidos, de 2,5ms, em espaço.

Os resultados obtidos, considerados inéditos na literatura, apresentam campos de velocidade médios para a seção transversal na região de pistão de líquido, a jusante da bolha de gás, e para a região de filme líquido, a montante do nariz da bolha alongada, assim como perfis de velocidade para três combinações de vazões de líquido e gás com velocidades superficiais $j_G = 0,5 \text{ m/s}$ e $j_L = 0,3, 0,4$ e $0,5 \text{ m/s}$. Tais velocidades superficiais acarretaram em números de Reynolds de mistura $Re_m = 3200, 36000$ e 40000 , evidenciando um escoamento turbulento, e números de Froude da mistura de $Fr_m = 1,28, 1,44$ e $1,60$, respectivamente.

Os resultados apresentados para os campos de velocidade média na região do pistão de líquido, mostraram um movimento descendente do líquido

nos planos próximos ao nariz da bolha e uma deformação nos perfis médios de velocidade axial. Este fenômeno, ocorre devido a influência da chegada iminente da bolha alongada, de maior velocidade, em relação ao líquido. Já para as posições no filme líquido, próximas ao nariz da bolha, os perfis médios de velocidade também apresentaram uma deformação. Esta, acontece devido à diferença entre velocidade de translação da bolha alongada e a velocidade da interface gás-líquido. Para os perfis apresentados, se o referencial da bolha fosse adotado, os perfis no filme apresentariam valor negativo, com magnitude crescente para regiões a montante do filme. Neste referencial, o escoamento no filme se comporta como um escoamento em canal convergente, este formado pela crescente área ocupada pela bolha de gás, o que justificaria, portanto, a aceleração espacial dos perfis.

Os dados originais obtidos caracterizam parte da complexa dinâmica do campo de velocidade do líquido sob influência da passagem da bolha alongada, em maior velocidade, para um escoamento intermitente de gás e líquido em uma tubulação horizontal. O presente trabalho, fornece informação, tanto para um melhor entendimento da física governando o fenômeno, quanto para validação de modelos numéricos.

Trabalhos futuros, para a mesma configuração experimental, podem determinar os campos vetoriais médios para diferentes vazões volumétricas de líquido e gás. Uma outra alternativa, seria a inversão de posição das câmeras de forma espelhada ao plano de laser. Desta maneira, seria possível obter os campos vetoriais médios das três componentes do vetor velocidade da região de esteira da bolha alongada, tomando a traseira da bolha como referência.

Os resultados obtidos no presente trabalho serviram de base para o trabalho intitulado "*Stereo-PIV measurements in the liquid phase of air-water horizontal intermittent pipe flows*", aceito para publicação no ICMF (*International Conference on Multiphase Flow*), a ser realizado em maio de 2019, no Rio de Janeiro.

Referências bibliográficas

- ABRANTES, J. K.; PAULA, I. B. de; AZEVEDO, L. F. A. **Medição de escoamentos turbulentos utilizando velocimetria por imagem de partículas**. [S.l.]: Capítulo, 2012. 133–209 p.
- ADRIAN, R. J.; WESTERWEEL, J. **Particle image velocimetry**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2011.
- BAKER, O. In: SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. **Design of pipelines for the simultaneous flow of oil and gas**. [S.l.]: Fall Meeting of the Petroleum Branch of AIME, 1953.
- BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 10, n. 4, p. 467–483, 1984.
- CARPINTERO-ROGERO. **Experimental investigation of developing plug and slug flows**. Tese (Doutorado) — Technische Universität München, 2009.
- CARPINTERO-ROGERO, E.; KRÖSS, B.; SATTELMAYER, T. Simultaneous hs-piv and shadowgraph measurements of gas-liquid flows in a horizontal pipe. In: **13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 26–29.
- CZAPP, M. et al. High-speed stereo and 2d piv measurements of two-phase slug flow in a horizontal pipe. In: **16th international symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics, Lisbon, Portugal**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 9–12.
- DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, ACS Publications, v. 14, n. 4, p. 337–347, 1975.
- FEBRES, M. et al. Three-dimensional unit slug in a horizontal pipeline. In: **7th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2010**. [S.l.: s.n.], 2010.
- FERNANDES, L. S. **Medição do Campo de Velocidade do Líquido no Escoamento Bifásico, Intermitente, em Duto Horizontal, Utilizando Velocimetria Estereoscópica**. Dissertação (Mestrado) — PUC-Rio, 2017.
- FERNANDES, L. S.; MARTINS, F. J.; AZEVEDO, L. F. A technique for measuring ensemble-averaged, three-component liquid velocity fields in two-phase, gas-liquid, intermittent pipe flows. **Experiments in Fluids**, Springer, v. 59, n. 10, p. 147, 2018.

- FONSECA JUNIOR. **Medição do Campo Instantâneo de Velocidade do Líquido no Escoamento Bifásico Intermitente em Tubos Horizontais e Inclinados**. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2009.
- GOLDSTEIN, R. **Fluid Mechanics Measurements**. [S.l.]: CRC Press, 1996.
- GREGORY, G.; SCOTT, D. Correlation of liquid slug velocity and frequency in horizontal cocurrent gas-liquid slug flow. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 15, n. 6, p. 933–935, 1969.
- HETSRONI, G. **Handbook of multiphase systems**. [S.l.]: McGraw-Hill Book Co., New York, NY, 1982.
- HURLBURT, E.; HANRATTY, T. Prediction of the transition from stratified to slug and plug flow for long pipes. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 28, n. 5, p. 707–729, 2002.
- LAURINDO, W. R. **Estudo experimental de bolhas alongadas no escoamento bifásico horizontal intermitente**. Dissertação (Mestrado) — PUC-Rio, 2012.
- LINDKEN, R.; MERZKIRCH, W. A novel piv technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. **Experiments in fluids**, Springer, v. 33, n. 6, p. 814–825, 2002.
- MANDHANE, J.; GREGORY, G.; AZIZ, K. A flow pattern map for gas—liquid flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 1, n. 4, p. 537–553, 1974.
- NICHOLSON, M.; AZIZ, K.; GREGORY, G. Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models. **The Canadian Journal of chemical engineering**, Wiley Online Library, v. 56, n. 6, p. 653–663, 1978.
- NICKLIN, D. Two-phase bubble flow. **Chemical engineering science**, Elsevier, v. 17, n. 9, p. 693–702, 1962.
- PRASAD, A. K. Stereoscopic particle image velocimetry. **Experiments in fluids**, Springer, v. 29, n. 2, p. 103–116, 2000.
- RAFFEL, M. et al. **Particle image velocimetry: a practical guide**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.
- SHARMA, S.; LEWIS, S.; KOJASOY, G. Local studies in horizontal gas-liquid slug flow. **Nuclear engineering and design**, Elsevier, v. 184, n. 2-3, p. 305–318, 1998.
- SOLOFF, S. M.; ADRIAN, R. J.; LIU, Z.-C. Distortion compensation for generalized stereoscopic particle image velocimetry. **Measurement science and technology**, IOP Publishing, v. 8, n. 12, p. 1441, 1997.
- SPEEDING, P.; NGUYEN, V. T. Regime maps for air water two phase flow. **Chemical Engineering Science**, Elsevier, v. 35, n. 4, p. 779–793, 1980.
- WALLIS, G. B. **One-dimensional two-phase flow**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1969.

WESTERWEEL, J. Fundamentals of digital particle image velocimetry. **Measurement science and technology**, IOP Publishing, v. 8, n. 12, p. 1379, 1997.

WOODS, B.; HANRATTY, T. Relation of slug stability to shedding rate. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 22, n. 5, p. 809–828, 1996.

A

Apêndice

Neste apêndice são apresentados os resultados para os campos médios de velocidade medidos nas regiões do pistão e filme de líquido para as condições de operação correspondentes aos casos 2 e 3.

A.1

Região de pistão de líquido

A.1.1

Caso 2

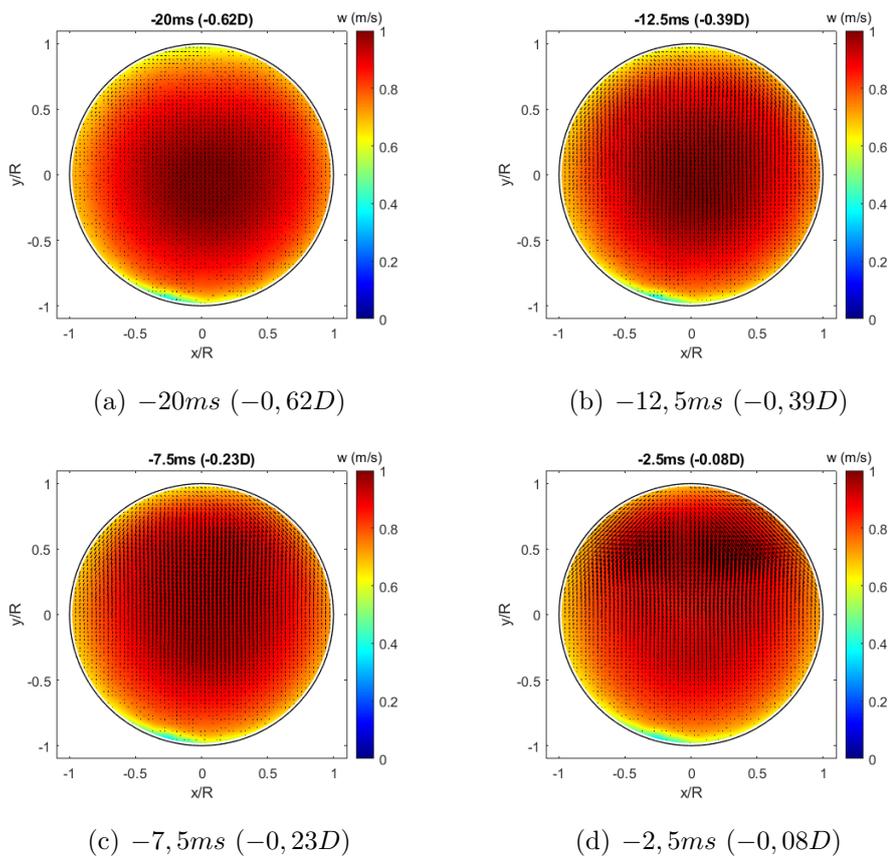


Figura A.1: Campos de velocidade na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.

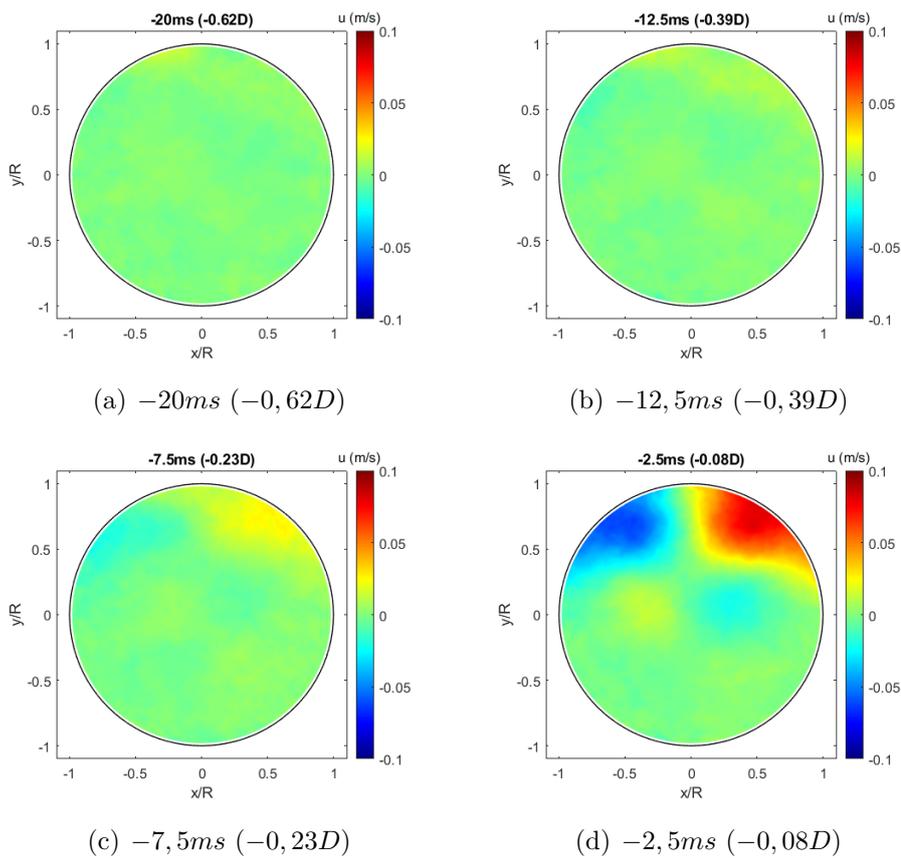


Figura A.2: Campos de velocidade horizontal, u , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$).

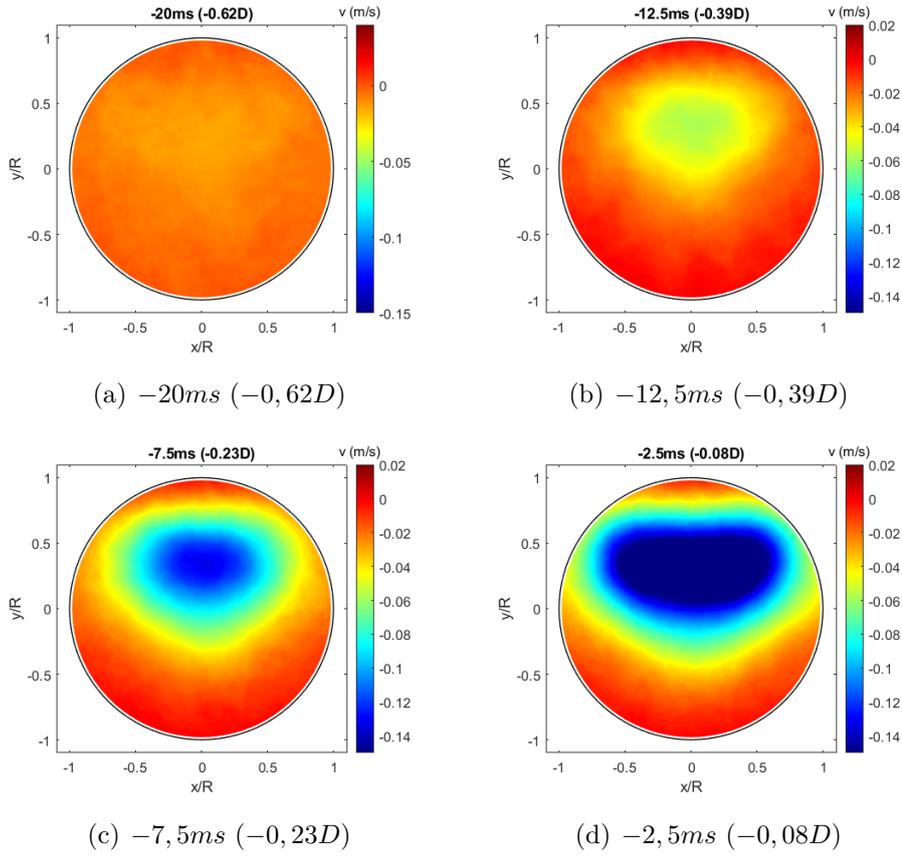


Figura A.3: Campos de velocidade vertical, v , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$).

A.1.2
Caso 3

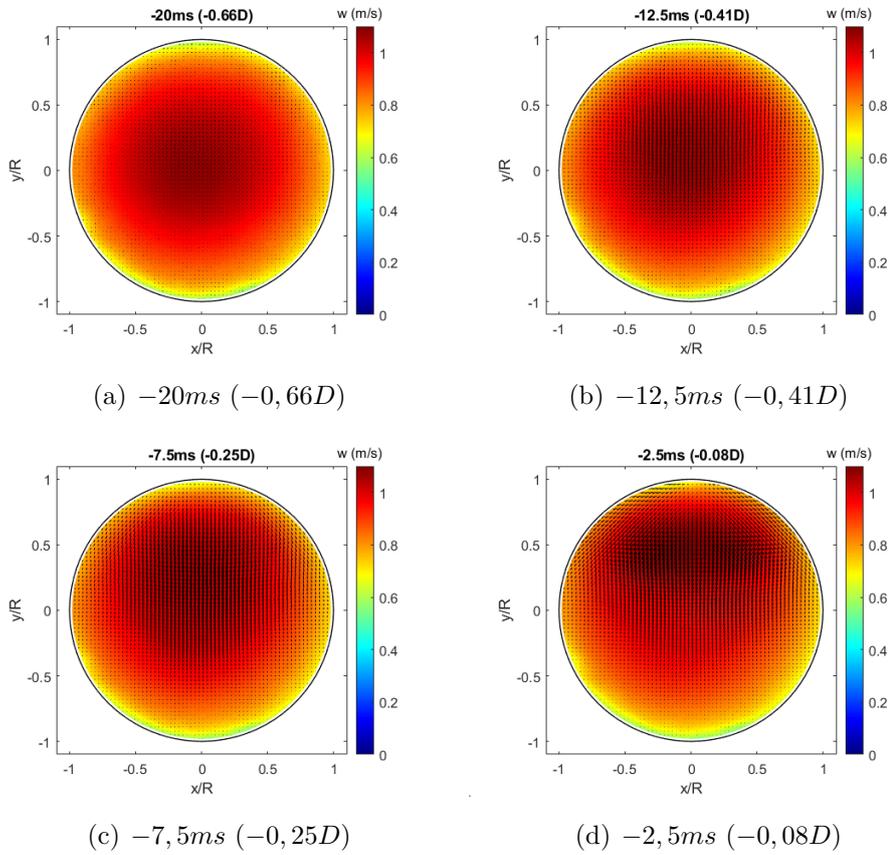


Figura A.4: Campos de velocidade na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.

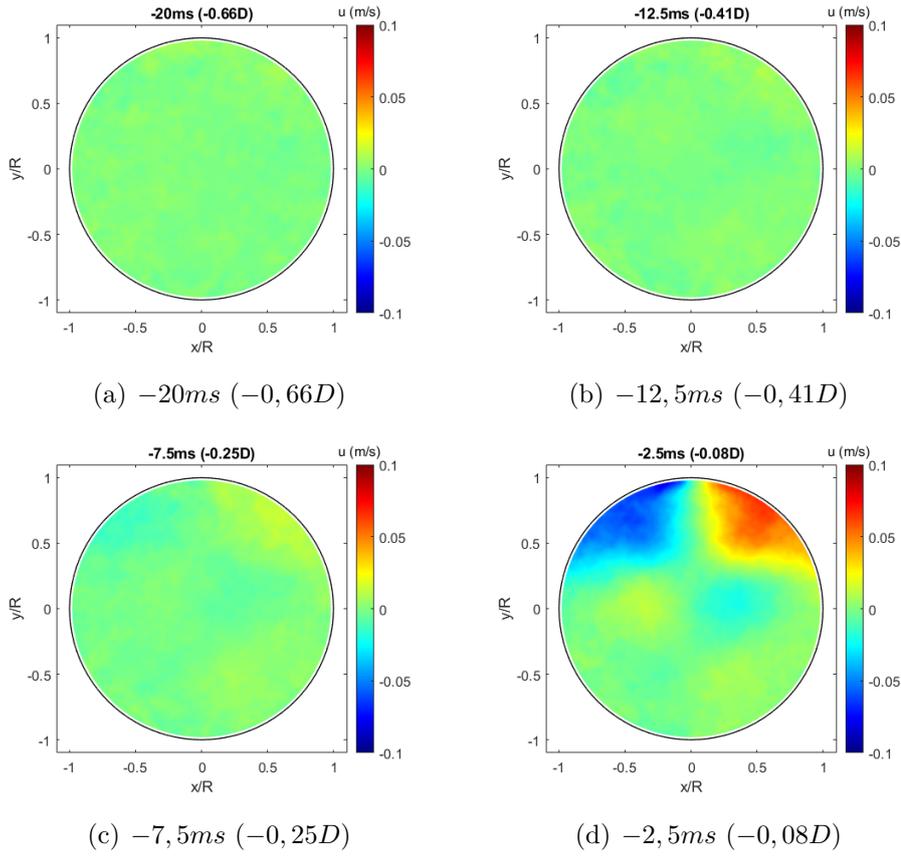


Figura A.5: Campos de velocidade horizontal, u , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$).

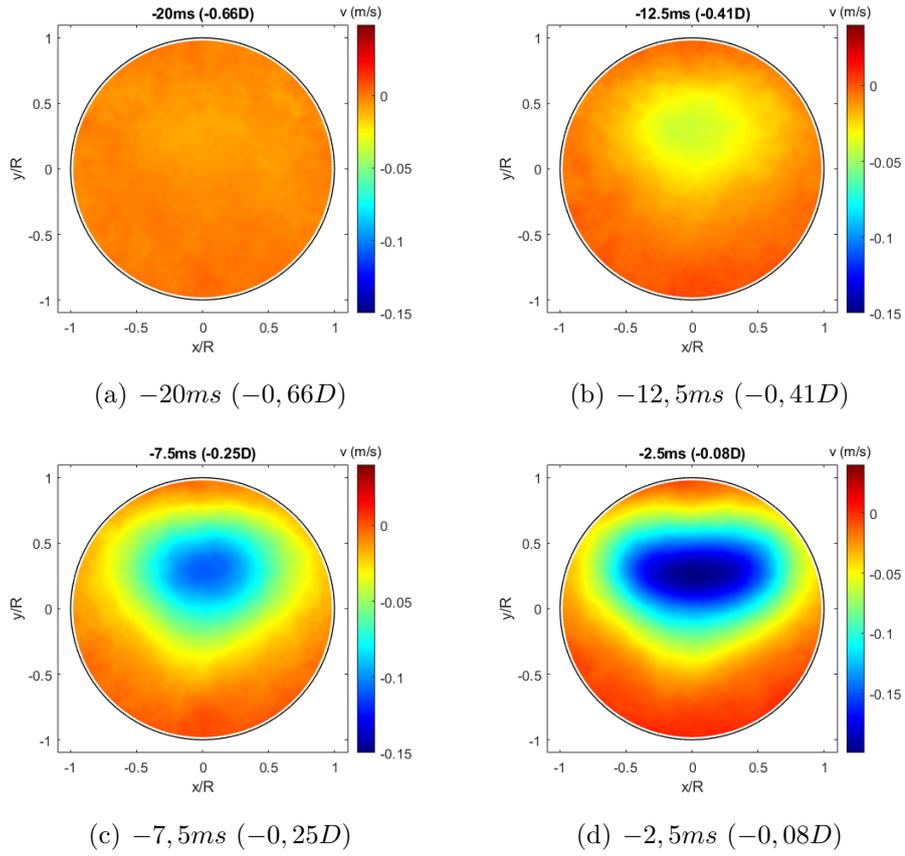


Figura A.6: Campos de velocidade vertical, v , na região do pistão de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$).

A.2
Região de filme de líquido

A.2.1
Caso 2

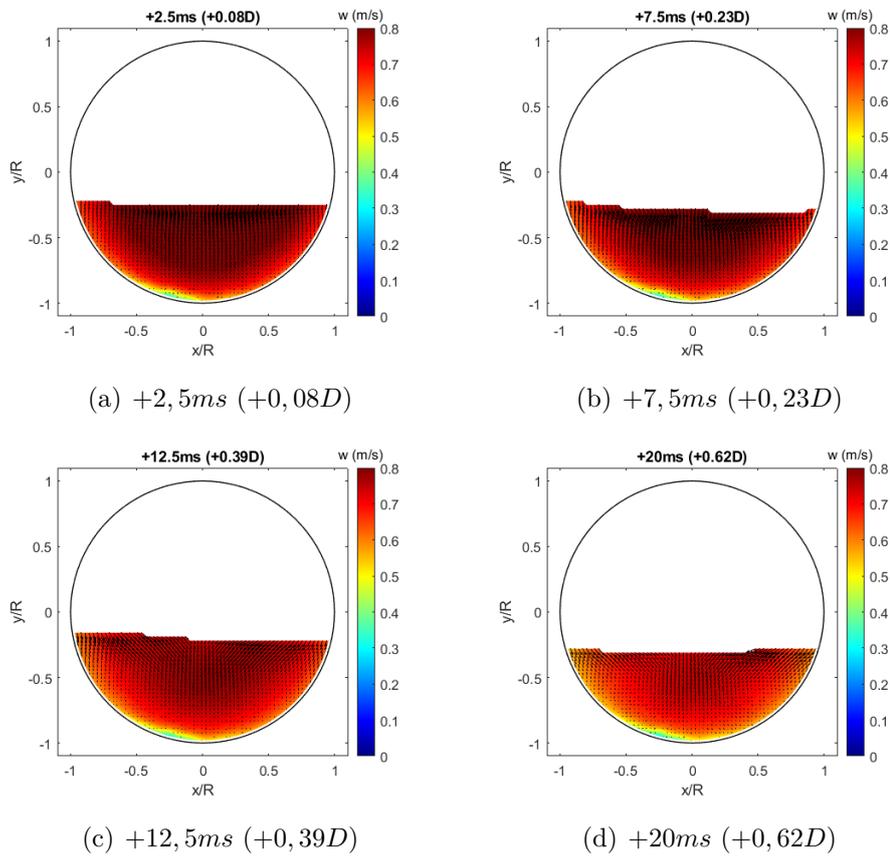


Figura A.7: Campos de velocidade na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.

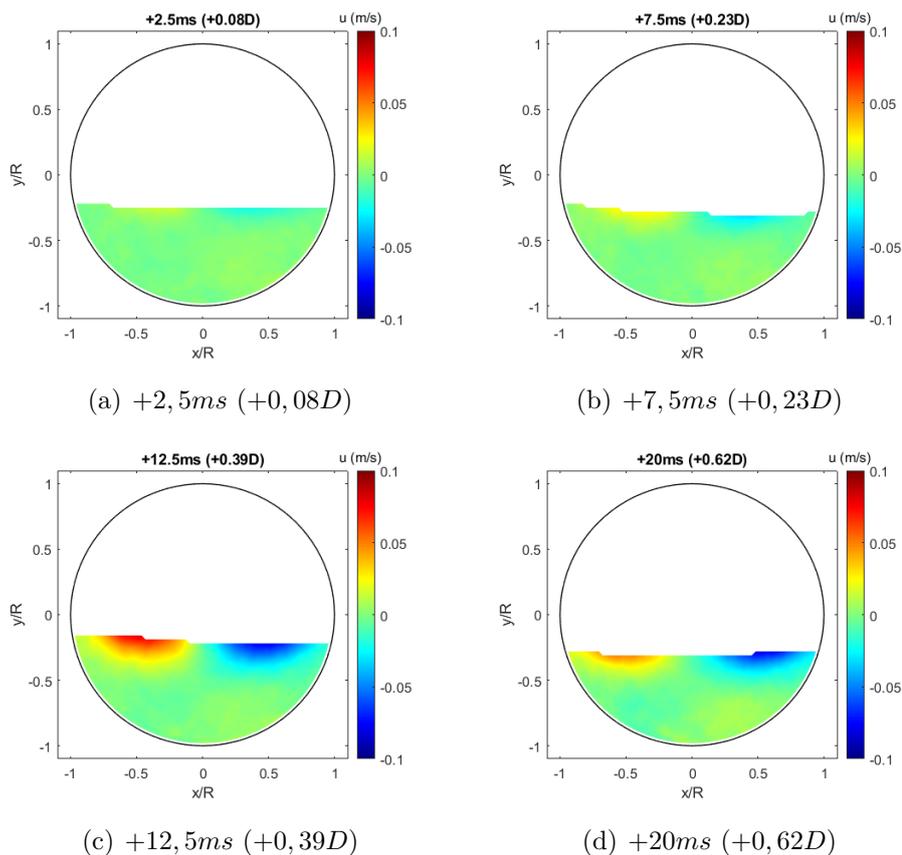


Figura A.8: Campos de velocidade horizontal, u , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$).

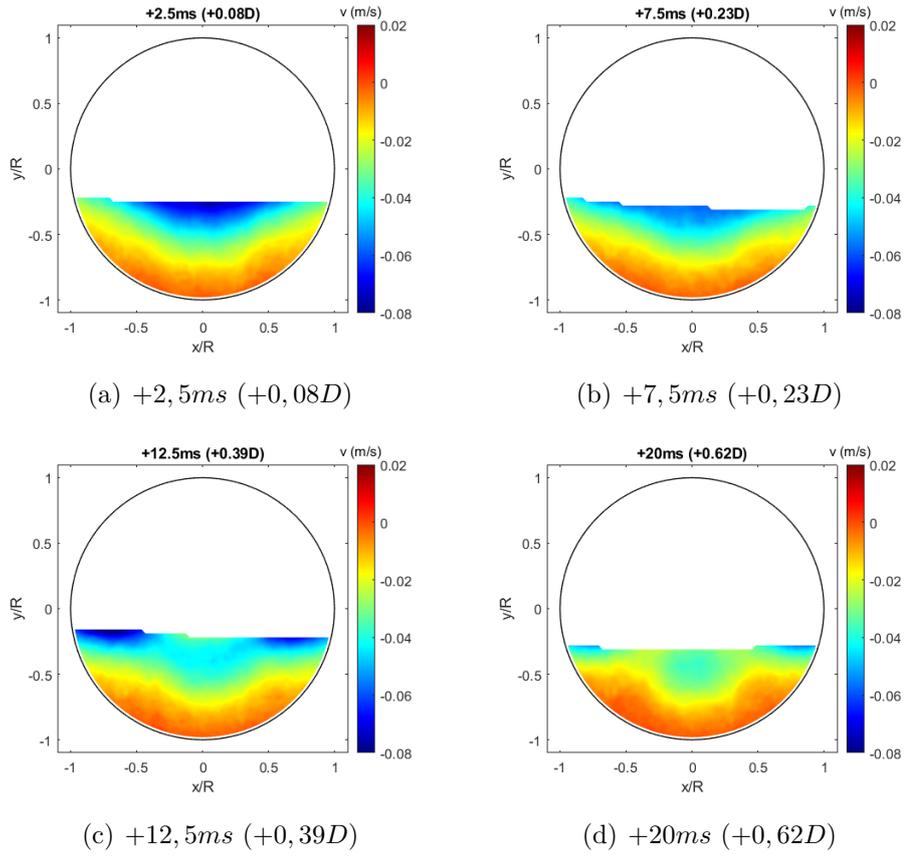


Figura A.9: Campos de velocidade vertical, v , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 2 ($j_L = 0,4 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$).

A.2.2
Caso 3

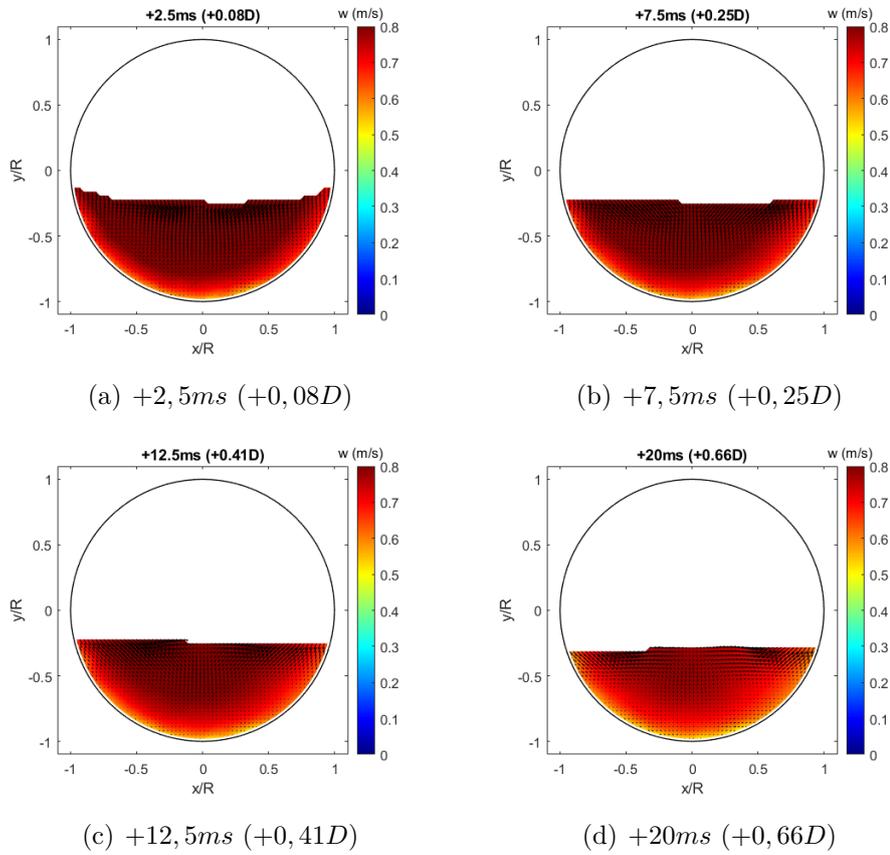


Figura A.10: Campos de velocidade na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$) e $j_G = 0,5 m/s$). Componente axial de velocidade, w , apresentada em escala de cores.

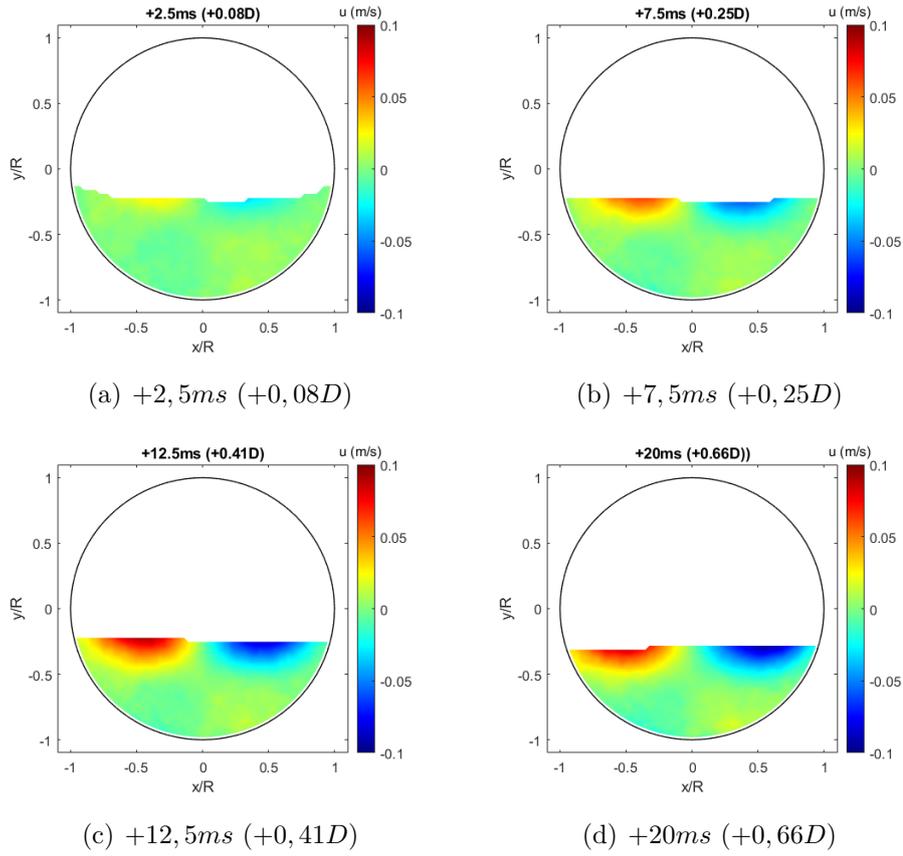


Figura A.11: Campos de velocidade horizontal, u , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 m/s$ e $j_G = 0,5 m/s$).

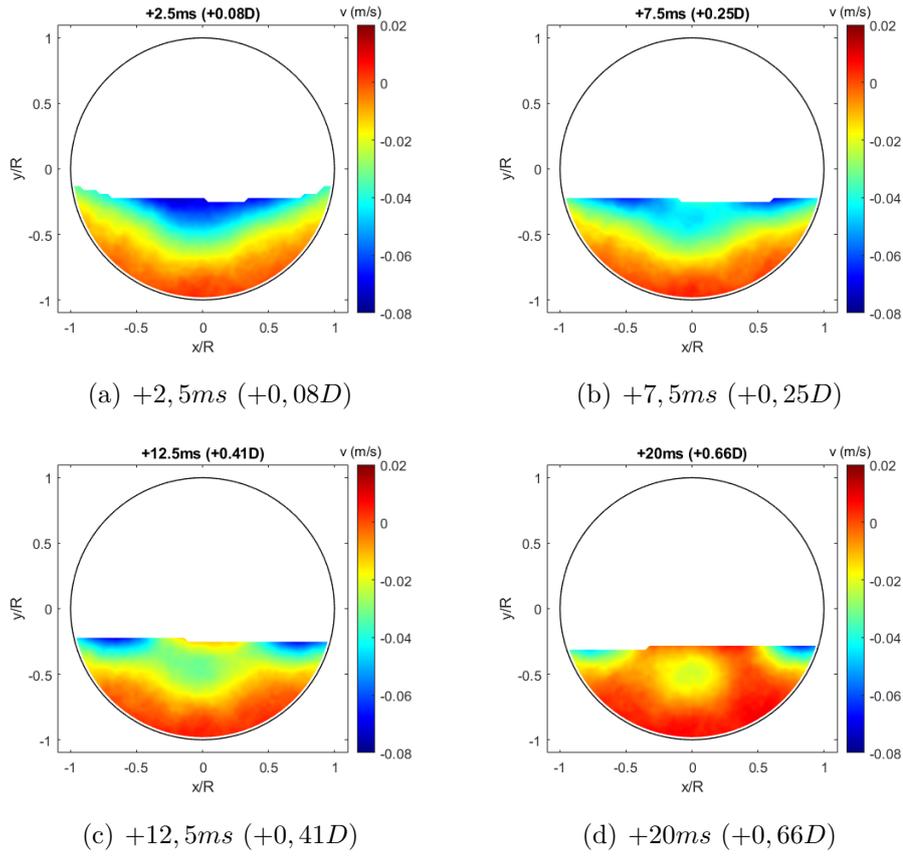


Figura A.12: Campos de velocidade vertical, v , na região do filme de líquido para as condições operacionais do Caso 3 ($j_L = 0,5 \text{ m/s}$ e $j_G = 0,5 \text{ m/s}$).