



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
Faculdade de Engenharia Mecânica

NATHAN DA COSTA MAIDANA

# Perturbações Induzidas por uma Placa de Orifício no Escoamento Horizontal de Ar e Água no Padrão Intermitente

CAMPINAS  
2017

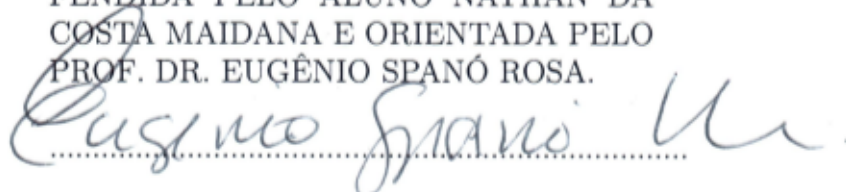
NATHAN DA COSTA MAIDANA

# Perturbações Induzidas por uma Placa de Orifício no Escoamento Horizontal de Ar e Água no Padrão Intermitente

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO NATHAN DA COSTA MAIDANA E ORIENTADA PELO PROF. DR. EUGÊNIO SPANÓ ROSA.



ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS  
2017



**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CAPES, 33003017

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

M28p Maidana, Nathan da Costa, 1992-  
Perturbações induzidas por uma placa de orifício no escoamento horizontal de ar e água no padrão intermitente / Nathan da Costa Maidana. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Eugênio Spanó Rosa.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Orifícios (Hidrodinâmica). 2. Pressão. 3. Escoamento multifásico. 4. Escoamento intermitente. 5. Escoamento pulsátil. I. Rosa, Eugênio Spanó, 1958-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Disturbances induced by an orifice plate on a horizontal air-water flow in the slug regime

**Palavras-chave em inglês:**

Orifices (Hydrodynamics)

Pressure

Multiphase flow

Slug flow

Pulsatile flow

**Área de concentração:** Térmica e Fluidos

**Titulação:** Mestre em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Eugênio Spanó Rosa [Orientador]

Ricardo Augusto Mazza

Jorge Luis Baliño

**Data de defesa:** 06-07-2017

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

# Perturbações Induzidas por uma Placa de Orifício no Escoamento Horizontal de Ar e Água no Padrão Intermitente

Autor: Nathan da Costa Maidana

Orientador: Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

**Prof. Dr. Eugênio Spanó Rosa**  
FEM/UNICAMP

**Prof. Dr. Ricardo Augusto Mazza**  
FEM/UNICAMP

**Prof. Dr. Jorge Luis Baliño**  
POLI/USP

A Ata da Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 06 de Julho de 2017.

*Aos meus pais, Paulo e Mari.*

*À minha companheira, Cheila.*

# Agradecimentos

Aos meus pais, Paulo e Mari, pelo apoio incondicional, inspiração e incentivo.

À Cheila, pelo incentivo, carinho, paciência e companheirismo.

Ao meu orientador, professor Eugênio Spanó Rosa, pelos ensinamentos, oportunidades e confiança depositada em mim.

Aos colaboradores e ex-colaboradores do grupo de pesquisa *Two-Phase Flow Group*: Lucas Dalla Maria, Maikon Bressani, Jéssica Gonçalves, Jonathan Sant'anna e ao professor Ricardo Mazza pelos aprendizados e discussões.

Ao corpo técnico do Departamento de Energia e do Laboratório de escoamento Bifásico: Adriano de Moraes, Alcimar da Silveira, Lucas Manço e Leonardo Tominaga pelo auxílio.

Aos amigos de pós-graduação: Bruno, Ednir, Eduardo, Gabriel Oliveira, Gabriel Meletti, Henrique, Jean, Marcos, Renato, Saon e Túlio pela amizade e convivência.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

## Resumo

As perturbações induzidas por uma placa de orifício em um escoamento de ar e água no regime intermitente são investigadas experimentalmente. A seção de testes é composta por uma tubulação de acrílico com diâmetro interno de 0,026 m e 1009 diâmetros de comprimento. A placa de orifício é caracterizada por um furo circular e concêntrico com bordas quadradas. Três placas de orifício com distintas razões de contração de área são testadas ao longo de três posições na seção de testes. A linha de testes possui quatro estações de medição, onde são medidos a fração de vazio e a pressão instantânea. Na placa de orifício, registra-se a evolução temporal da pressão diferencial. O processamento de dados é utilizado para calcular a velocidade de translação do nariz da bolha alongada bem como a frequência de passagem de golfadas. Na análise da pressão, usam-se valores médios e suas respectivas flutuações, as funções densidade de probabilidade e as densidades espectrais de potência com o intuito de estimar as perturbações causadas pela placa de orifício. Os sinais de pressão diferencial na placa de orifício e da pressão nas estações de medição revelaram seu comportamento pulsátil devido a passagem intermitente de misturas ricas em líquido e ricas em gás pela placa de orifício. As perturbações da singularidade na fração de vazio, velocidade de translação do nariz da bolha alongada e na frequência de passagem de golfadas apresentam dependência da razão de contração de área e da posição axial da obstrução na seção de testes. Os valores médios da pressão diferencial mostraram-se dependentes somente da razão de contração de área para uma mesma combinação de velocidades superficiais.

**Palavras-chave:** placa de orifício, gás-líquido, pressão diferencial, escoamento intermitente, escoamento pulsátil.

# Abstract

An experimental study of the flow disturbances caused by an orifice plate on an air-water mixture on the slug regime is investigated. The test section is a horizontal acrylic pipe with 0.026 m of inner diameter and 1009 pipe diameters long. The orifice plate is a flat plate with a sharp-edged concentric and circular hole. Three orifices with distinct area contraction ratios are tested at three axial positions along the test section. The test section has four measuring stations responsible to record the instantaneous void fraction and pressure signals. The pressure difference at the orifice plate is also recorded. The data is further processed to get the bubble nose translational velocities and the slug frequency. To evaluate the pressure, it is used the average and fluctuating values, the corresponding probability density functions and the power spectral densities in order to analyze the flow disturbances. The pressure difference at the orifice and the absolute pressure at the measuring stations reveal a pulsatile behavior of the pressure signal due to the intermittent passage of mixtures rich in liquid followed by mixtures rich in gas through the orifice plate. The disturbances of the singularity on the void fraction, bubble nose velocity and frequency of passage of slugs are detected exhibiting a dependence on the distance from the mixer and of the area contraction ratio. On the other hand, the average pressure difference at the orifice plate is not sensitive to the distance from the mixer for a fixed air and water flow rate.

**Keywords:** orifice plate, gas-liquid, pressure difference, slug flow, pulsatile flow.

## Lista de Ilustrações

Figura 1.1	Padrões de escoamento de gás-líquido horizontal. Fonte: adaptada de Shoham (2006).	19
Figura 2.1	Pressão ao longo de uma placa de orifício fina e placa de orifício grossa. Fonte: Chisholm (1983).	24
Figura 3.1	Desenho esquemático do aparato experimental, adaptado de Dalla Maria (2016).	30
Figura 3.2	Componentes da linha de ar comprimido.	30
Figura 3.3	Componentes da linha de líquido.	31
Figura 3.4	Injetor gás-líquido.	31
Figura 3.5	Nivelamento à laser da seção de testes.	32
Figura 3.6	Placas de orifício utilizadas e as respectivas razões de contração de área.	34
Figura 3.7	Instalação e detalhamento das placas de orifício.	34
Figura 3.8	Detalhamento da sonda de haste. Fonte: (b) em Dalla Maria (2016).	36
Figura 3.9	Sonda de contato.	37
Figura 3.10	Interface do programa Supervisor.	39
Figura 3.11	Fluxograma do monitoramento dos fluidos de teste.	40
Figura 3.12	Filmagem do escoamento gás-líquido na seção de testes.	40
Figura 3.13	Interface do programa Adquire.	41
Figura 3.14	Velocidades superficiais de gás e líquido na saída da seção de testes para $\sigma = 0,072$ e <i>setup C</i> .	43
Figura 3.15	Interface gráfica do programa Slug.	44
Figura 3.16	Gráficos de dependência funcional entre fator de corte e número de bolhas.	45
Figura 3.17	Sinais de tensão normalizada em função do tempo das sondas de haste e ondas quadradas provenientes do fator de corte.	46
Figura 3.18	Opções de PDFs instantâneos extraídos diretamente do arquivo .adq.	46
Figura 3.19	Sinais lógicos do par de sondas de haste de determinada estação de medição. Fonte: Duarte (2007)	48
Figura 4.1	Escoamento em tubo livre. Ponto de filmagem: 501 D à jusante do injetor gás-líquido.	51
Figura 4.2	Deslocamento retrógrado do nariz da bolha alongada - <i>Setup B</i> e $\sigma = 0,072$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.	53
Figura 4.3	Deslocamento retrógrado do pistão de líquido - <i>Setup B</i> e $\sigma = 0,072$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.	55

Figura 4.4	Deslocamento retrógrado do nariz da bolha alongada - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,123$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício. . . . .	56
Figura 4.5	Deslocamento retrógrado em uma bolha de gás - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,123$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício. . . . .	57
Figura 4.6	Deslocamento retrógrado da cauda da bolha alongada - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,072$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício. . . . .	59
Figura 4.7	Efeito de desaceleração e aceleração no escoamento - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,072$ , intervalo de 5 frames ou 0,025 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício. . . . .	60
Figura 4.8	Ruptura da bolha de gás - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,072$ , intervalo de 5 frames ou 0,025 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício. . . . .	61
Figura 4.9	Ruptura da bolha de gás - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,250$ , intervalo de 0,05 segundos entre fotos (10 frames). Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício. . . . .	62
Figura 4.10	Passagem do pistão de líquido pela placa de orifício para $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072. Ponto de filmagem: placa de orifício no <i>setup</i> B. . . . .	63
Figura 4.11	Destruição do regime de jato à jusante da obstrução devido a recirculação de fluidos - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,250$ . Ponto de filmagem: placa de orifício no <i>setup</i> B. . . . .	64
Figura 4.12	Fenômeno de recirculação à jusante da placa de orifício - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,072$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 38 D à jusante da placa de orifício no <i>setup</i> B. . . . .	64
Figura 4.13	Entrada da bolha de gás na placa de orifício - <i>Setup</i> B e $\sigma = 0,072$ , intervalo de 1 frame ou 0,005 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: placa de orifício no <i>setup</i> B. . . . .	65
Figura 4.14	Passagem da bolha de gás pela placa de orifício para $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072. Ponto de filmagem: placa de orifício no <i>setup</i> B. . . . .	66
Figura 5.1	Mapa de padrões de fluxo horizontal. . . . .	71
Figura 5.2	Pressão absoluta média nas estações E1 até E4 e pressão atmosférica na saída da seção de testes para tubo livre ( $\square$ ), $\sigma = 0,250$ ( $\diamond$ ), $\sigma = 0,123$ ( $\circ$ ) e $\sigma = 0,072$ ( $\triangle$ ) utilizando os <i>setups</i> A, B e C. . . . .	72
Figura 5.3	Evolução temporal da pressão diferencial instantânea na placa de orifício e seu valor médio para $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 e <i>setups</i> A, B e C. . . . .	75



Figura 5.4	Evolução temporal da pressão diferencial na placa de orifício em sincronia com o sinal de tensão normalizada da sonda de contato. <i>Setup B</i> e $\sigma = 0,123$ e $0,072$ . . . . .	76
Figura 5.5	Função densidade de probabilidade da flutuação instantânea da pressão diferencial na placa de orifício para $\sigma = 0,250$ , $0,123$ e $0,072$ e <i>setups A, B e C</i> . . . . .	77
Figura 5.6	Densidade espectral de potência da pressão diferencial instantânea na placa de orifício para $\sigma = 0,250$ , $0,123$ e $0,072$ e <i>setups A, B e C</i> . . . . .	79
Figura 5.7	(a) pressão diferencial adimensional média em função de $1/\sigma^2$ ; (b) razão entre flutuação média e pressão diferencial média em função de $1/\sigma^2$ . . . . .	81
Figura 5.8	Flutuações instantâneas da pressão diferencial e da pressão nas estações de medição E1 até E4 para $\sigma = 0,072$ nos <i>setups A, B e C</i> . . . . .	83
Figura 5.9	Densidade espectral de potência flutuação da pressão diferencial instantânea na placa de orifício e das flutuações de pressão nas estações de medição para $\sigma = 0,072$ nos <i>setups A, B e C</i> . . . . .	84
Figura 5.10	Evolução temporal da fração de vazio nas estações E1 e E4 para tubo livre e para $\sigma = 0,250$ , $0,123$ e $0,072$ presentes no <i>setup A</i> . . . . .	85
Figura 5.11	Evolução temporal da fração de vazio nas estações E1 e E3 para tubo livre e para $\sigma = 0,250$ , $0,123$ e $0,072$ presentes no <i>setup B</i> . . . . .	86
Figura 5.12	Evolução temporal da fração de vazio nas estações E1 e E4 para tubo livre e para $\sigma = 0,250$ , $0,123$ e $0,072$ presentes no <i>setup C</i> . . . . .	87
Figura 5.13	Fração de vazio média nas estações E1 até E4 para <i>setups A, B e C</i> . Legenda: tubo livre ( $\square$ ), $\sigma = 0,250$ ( $\diamond$ ), $\sigma = 0,123$ ( $\circ$ ) e $\sigma = 0,072$ ( $\triangle$ ). . . . .	87
Figura 5.14	Função densidade de probabilidade da fração de vazio instantânea nas estações de medição para tubo livre e para $\sigma = 0,250$ , $0,123$ e $0,072$ nos <i>setups A, B e C</i> . Legenda: tubo livre (—), $\sigma = 0,250$ (—), $\sigma = 0,123$ (—), $\sigma = 0,072$ (—). . . . .	90
Figura 5.15	Velocidade média de translação do nariz da bolha alongada nas estações E1 até E4 para <i>setups A, B e C</i> . Legenda: tubo livre ( $\square$ ), $\sigma = 0,250$ ( $\diamond$ ), $\sigma = 0,123$ ( $\circ$ ) e $\sigma = 0,072$ ( $\triangle$ ). . . . .	93
Figura 5.16	Função densidade de probabilidade da velocidade de translação do nariz da bolha alongada nas estações de medição para tubo livre e para $\sigma = 0,250$ , $0,123$ e $0,072$ nos <i>setups A, B e C</i> . Legenda: tubo livre (—), $\sigma = 0,250$ (—), $\sigma = 0,123$ (—), $\sigma = 0,072$ (—). . . . .	94
Figura 5.17	Frequência média de passagem de golfadas nas estações de medição E1 até E4 para <i>setups A, B e C</i> . Legenda: tubo livre ( $\square$ ), $\sigma = 0,250$ ( $\diamond$ ), $\sigma = 0,123$ ( $\circ$ ) e $\sigma = 0,072$ ( $\triangle$ ). . . . .	96

## Lista de Tabelas

Tabela 3.1	Distâncias entre injetor gás-líquido, estações de medição e placas de orifício a partir de diferentes referências. . . . .	35
Tabela 3.2	Grade de testes. . . . .	42
Tabela 5.1	Grade de testes. Velocidade superficial de líquido, velocidade superficial de gás e número de unidades para cada série. . . . .	69
Tabela 5.2	Número de Reynolds e número de Froude em função da velocidade superficial média da mistura para cada série. . . . .	70
Tabela 5.3	Distâncias entre injetor gás-líquido, estações de medição e placas de orifício a partir de diferentes referências. . . . .	72
Tabela 5.4	Aumento médio em relação ao tubo livre na pressão absoluta à montante da placa de orifício para <i>setups</i> A, B e C e $\sigma = 0,250, 0,123$ e $0,072$ . . . . .	73
Tabela 5.5	Pressão absoluta média para $\sigma = 0,250, 0,123$ e $0,072$ nos <i>setups</i> A, B e C. . . . .	74
Tabela 5.6	Gradiente médio de pressão para escoamento em tubo livre e para <i>setups</i> B e C incluindo $\sigma = 0,250, 0,123$ e $0,072$ à montante da obstrução. . . . .	74
Tabela 5.7	Potência da pressão diferencial contida entre $0,10$ e $0,90$ Hz, em %. . . . .	80
Tabela 5.8	Valores médios da pressão diferencial e da flutuação na placa de orifício, em kPa. . . . .	80
Tabela 5.9	Valores médios da perda de pressão estimados pela Figura 5.2, em kPa. . . . .	81
Tabela 5.10	Fração de vazio média nas estações de medição E1 até E4 para tubo livre e para $\sigma = 0,250, 0,123$ e $0,072$ presentes <i>setups</i> A, B e C. . . . .	88
Tabela 5.11	Velocidade média de translação do nariz da bolha alongada nas estações de medição E1 até E4 para tubo livre e para $\sigma = 0,250, 0,123$ e $0,072$ presentes <i>setups</i> A, B e C. . . . .	93
Tabela 5.12	Frequência média de passagem de golfadas nas estações de medição E1 até E4 para tubo livre e para $\sigma = 0,250, 0,123$ e $0,072$ presentes <i>setups</i> A, B e C. . . . .	97

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Letras Latinas*

$B$	- constante utilizada em Chisholm (1983)	[—]
$C_c$	- coeficiente de contração relacionado à vena-contracta	[—]
$C_D$	- coeficiente de descarga na placa de orifício	[—]
$cpb$	- conjunto pistão-bolha/célula unitária	[—]
$d$	- diâmetro do orifício	[ $m$ ]
$D$	- diâmetro interno da seção de testes	[ $m$ ]
$E1$	- estação de medição 1	[—]
$E2$	- estação de medição 2	[—]
$E3$	- estação de medição 3	[—]
$E4$	- estação de medição 4	[—]
$f$	- frequência	[ $Hz$ ]
$f_j$	- frequência de passagem da j-ésima unidade	[ $Hz$ ]
$f_{aq}$	- frequência de amostragem	[ $Hz$ ]
$FC$	- fator de corte	[—]
$Fr$	- número de Froude	[—]
$g$	- aceleração gravitacional	[ $m/s^2$ ]
$h_f$	- altura de filme na seção de testes	[ $m$ ]
$h_f/D$	- altura instantânea de filme de líquido adimensional na seção de testes	[—]
$h_f/D_j$	- altura de filme adimensional da j-ésima bolha de gás	[—]
$J$	- velocidade superficial da mistura	[ $m/s$ ]
$J_G$	- velocidade superficial da fase gasosa	[ $m/s$ ]
$J_L$	- velocidade superficial da fase líquida	[ $m/s$ ]
$L_e$	- comprimento efetivo	[ $m$ ]
$L_{fj}/D$	- comprimento adimensional da bolha alongada da j-ésima unidade	[—]
$L_{Sj}/D$	- comprimento adimensional do pistão de líquido da j-ésima unidade	[—]
$\dot{m}$	- vazão mássica	[ $kg/s$ ]
$\dot{m}_G$	- vazão mássica da fase gasosa	[ $kg/s$ ]
$\dot{m}_L$	- vazão mássica da fase líquido	[ $kg/s$ ]
$N$	- número de amostras	[—]
$P$	- pressão	[ $kPa$ ]
$\bar{P}$	- pressão absoluta média	[ $kPa$ ]
$P_0$	- pressão absoluta à montante do bocal sônico	[ $kPa$ ]
$P_b$	- pressão absoluta à jusante do bocal sônico	[ $kPa$ ]

$Re$	- número de Reynolds	$[-]$
$S$	- escorregamento entre as fases gasosa e líquida	$[-]$
$S_p$	- espaçamento entre duas sondas de haste de uma determinada estação de medição	$[m]$
$t$	- tempo	$[s]$
$t_o$	- espessura da placa de orifício	$[m]$
$tb_{i,j}$	- tempo de residência da bolha da unidade j em contato com a sonda de haste i	$[s]$
$ts_{i,j}$	- tempo de residência do pistão de líquido da unidade j em contato com a sonda de haste i	$[s]$
$TB_{i,j}$	- intervalo de tempo entre o início da aquisição e a bolha da unidade j na sonda de haste i	$[s]$
$TS_{i,j}$	- intervalo de tempo entre o início da aquisição e o pistão de líquido da unidade j na sonda de haste i	$[s]$
$u_T$	- velocidade de translação do nariz da bolha alongada	$[m/s]$
$u_{Tj}$	- velocidade de translação do nariz da j-ésima bolha	$[m/s]$
$v_G$	- volume específico da fase gasosa presente em James (1965)	$[ft^3/lb]$
$v_L$	- volume específico da fase líquida presente em James (1965)	$[ft^3/lb]$
$V$	- tensão medida na sonda de condutância	$[V]$
$V^*$	- tensão adimensional normalizada	$[-]$
$V_{min}$	- voltagem da sonda na fase gasosa	$[V]$
$V_{max}$	- voltagem da sonda na fase líquida	$[V]$
$x$	- título / qualidade do vapor	$[-]$
$X^2$	- parâmetro de Lockhart-Martinelli ( $\Delta P_{L0}/\Delta P_{G0}$ )	$[-]$
$z$	- coordenada axial da seção de testes	$[m]$

### ***Letras Gregas***

$\alpha$	- fração de vazio	$[-]$
$\alpha_j$	- fração de vazio da j-ésima unidade	$[-]$
$\alpha_h$	- fração de vazio considerando modelo homogêneo	$[-]$
$\beta$	- razão entre diâmetro do orifício e diâmetro da seção de testes, $d/D$	$[-]$
$\delta$	- incerteza absoluta	$[-]$
$\Delta L$	- distância entre estações de medição consecutivas	$[m]$
$\Delta P'$	- flutuação instantânea da pressão diferencial na placa de orifício	$[kPa]$

$\Delta P_{TP}$	- perda de pressão bifásica após recuperação da pressão diferencial	[kPa]
$\Delta P_{G0}$	- perda de pressão no orifício somente com fase gasosa escoando	[kPa]
$\Delta P_{L0}$	- perda de pressão no orifício somente com fase líquida escoando	[kPa]
$\Delta P_o$	- pressão diferencial bifásica na placa de orifício	[kPa]
$\Delta P_o^*$	- pressão diferencial adimensional na placa de orifício	[-]
$\Delta TB_j$	- intervalo de tempo necessário para o nariz da j-ésima bolha alongada transladar entre as sondas de haste de determinada estação de medição	[s]
$\varepsilon$	- incerteza relativa	[-]
$\mu_L$	- viscosidade absoluta da fase líquida	[Pa.s]
$\phi_{G0}^2$	- multiplicador bifásico da fase gasosa ( $\Delta P_{TP}/\Delta P_{G0}$ )	[-]
$\phi_{L0}^2$	- multiplicador bifásico da fase líquida ( $\Delta P_{TP}/\Delta P_{L0}$ )	[-]
$\rho_L$	- massa específica da fase líquida	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_G$	- massa específica da fase gasosa	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_m$	- massa específica da mistura	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	- razão de contração de área	[-]
$\sigma_P$	- desvio padrão	[-]
$\theta$	- constante utilizada em Lin (1982) na Equação 2.4	[-]

### ***Siglas***

2PFG	- Two-Phase Flow Group
FEM	- Faculdade de Engenharia Mecânica
PDF	- Função Densidade de Probabilidade
PSD	- Densidade Espectral de Potência
RMS	- Raiz do Valor Quadrático Médio
UNICAMP	- Universidade Estadual de Campinas

### ***Subscritos***

f	- filme de líquido
G	- fase gasosa

- G0 - somente gás escoando
- h - homogêneo
- i - posição da sonda de haste
- j - número da unidade
- L - fase líquida
- L0 - somente líquido escoando
- m - mistura
- M - média
- o - orifício
- TP - duas fases ("*two-phase*")
- u - célula unitária/unidade

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1	Estrutura da Dissertação . . . . .	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>22</b>
<b>3</b>	<b>APARATO EXPERIMENTAL E PROCESSAMENTO DE DADOS</b>	<b>29</b>
3.1	Descrição do Aparato Experimental . . . . .	29
3.2	Placas de Orifício . . . . .	33
3.3	Instrumentação . . . . .	35
3.3.1	Sonda de Haste e Sonda de Contato . . . . .	36
3.3.2	Transdutor de Pressão . . . . .	37
3.3.3	Transmissor de Temperatura . . . . .	38
3.4	Monitoramento dos Fluidos de Teste . . . . .	38
3.5	Módulo de Aquisição de Dados . . . . .	41
3.6	Procedimento Experimental . . . . .	42
3.7	Processamento de Dados . . . . .	43
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DAS IMAGENS DO ESCOAMENTO</b>	<b>51</b>
4.1	Imagens à 131 D à Montante do Orifício . . . . .	51
4.2	Imagens no Orifício e 38 D à Jusante . . . . .	62
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>68</b>
5.1	Condições Operacionais . . . . .	68
5.2	Pressão . . . . .	71
5.2.1	Pressão Absoluta e Gradiente de Pressão na Seção de Testes . . . . .	71
5.2.2	Pressão Diferencial na Placa de Orifício . . . . .	75
5.2.3	Estimativa da Perda de Pressão Média ( $\overline{\Delta P}_{TP}$ ) . . . . .	81
5.2.4	Fase e Espectro do Pulso de Pressão . . . . .	82
5.3	Fração de Vazio . . . . .	84
5.4	Velocidade de Translação do Nariz da Bolha . . . . .	91
5.5	Frequência de Passagem de Golfadas . . . . .	95
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>98</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>101</b>
<b>A</b>	<b>Apêndice A - Análise de Incertezas</b>	<b>104</b>
A.1	Incerteza da Pressão . . . . .	104
A.2	Incerteza da Fração de Vazio . . . . .	104
A.3	Incerteza da Velocidade de Translação do Nariz da Bolha Alongada . . . . .	104

A.4 Incerteza da Frequência de Passagem de Golfadas . . . . .	106
---	-----



# 1. INTRODUÇÃO

Denomina-se escoamento multifásico o escoamento de duas ou mais fases imiscíveis com diferentes propriedades físicas. Fase, neste caso, representa uma quantidade de matéria homogênea seja sólida, líquida ou gás, separada por uma interface.

Escoamentos multifásicos são amplamente encontrados tanto em processos naturais quanto industriais. Na natureza, o escoamento de duas ou mais fases pode ser encontrado nas tempestades de areia, transporte de sedimentos em rios e correntes marinhas, chuva entre outros. Na indústria é possível obter escoamento multifásico em caldeiras, torres de resfriamento, sistemas de refrigeração e produção de petróleo, sendo o foco deste trabalho o escoamento gás-líquido. O arranjo das fases dentro da tubulação varia de acordo com a vazão de cada fluido, geometria do canal de escoamento e inclinação da tubulação, resultando em diferentes padrões de escoamento. A Figura 1.1 expõe os tipos de padrões de escoamento horizontal de gás e de líquido.

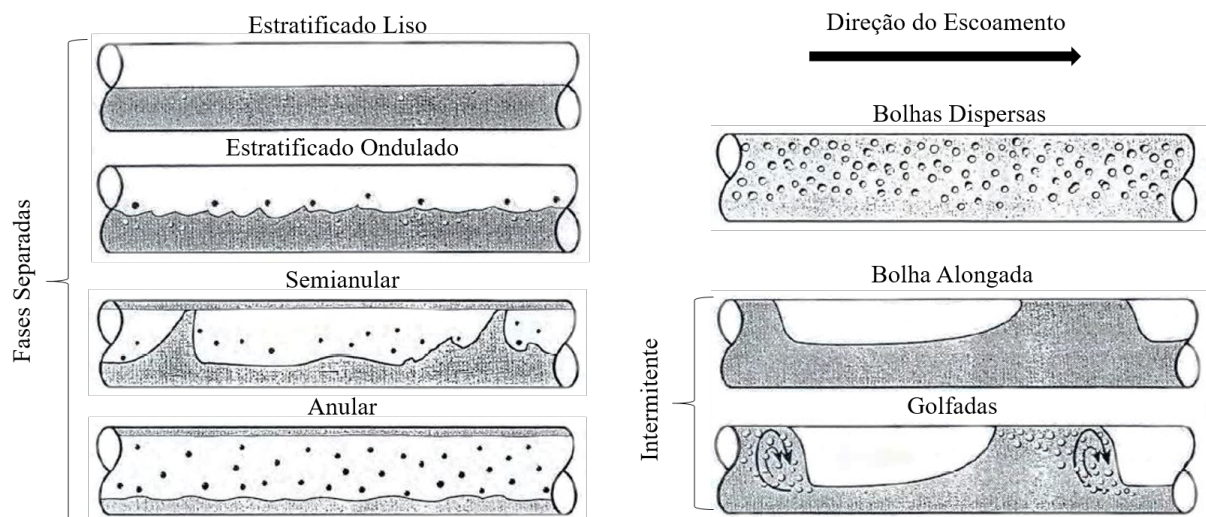


Figura 1.1: Padrões de escoamento de gás-líquido horizontal. Fonte: adaptada de Shoham (2006).

O padrão onde a fase gasosa está dispersa na fase líquida se chama bolhas dispersas. Já em fases separadas existe o escoamento estratificado liso, estratificado ondulado, semianular e anular, veja Figura 1.1. O padrão estratificado ocorre com velocidades superficiais baixas, onde o fluido de maior densidade escoar na parte inferior da tubulação e o de menor densidade na parte superior. O padrão anular é caracterizado pela fase líquida escoando em contato com a parede do tubo e a fase gasosa com gotas de líquido dispersas, ao meio.

Já o padrão intermitente, estudado neste trabalho, caracteriza-se por uma junção entre o escoamento de fases separadas e fases dispersas, onde ocorre a existência de um

pistão de líquido que representa o regime de fases dispersas e a bolha alongada, considerado o regime de fases separadas.

Escoamento multifásico através de singularidades (placas de orifício, válvulas *choke*, redução e expansão de dutos) estão presentes em tubulações industriais por diversas razões. A placa de orifício, por exemplo, tem como principal função servir como medidor de vazão, uma vez que o fluxo que passa pelo orifício é função da perda de pressão causada na singularidade.

A complexidade do escoamento multifásico na presença de uma placa de orifício desafia a modelagem matemática bem como as técnicas experimentais. Os efeitos causados pela contração e expansão abrupta do orifício causam uma deformação contínua da interface, modificando as propriedades do escoamento próximo e distante da obstrução. A razão de contração de área causada por uma placa de orifício será identificada pela letra grega  $\sigma$ , definida na Equação 1.1:

$$\sigma = \left( \frac{d}{D} \right)^2, \quad (1.1)$$

onde  $d$  é o diâmetro do orifício e  $D$  é o diâmetro interno da seção de testes.

O número de trabalhos que relatam alterações das propriedades do escoamento multifásico induzidas por uma placa de orifício é pequeno e a maioria se concentra em alterações nas proximidades do orifício. Ademais, nos trabalhos anteriores, as singularidades possuem uma distância do injetor gás-líquido fixa, geralmente variando entre 70  $D$  e 150  $D$ .

Destaca-se, portanto, a falta de análise das propriedades distantes da obstrução bem como a sensibilidade das propriedades em função da posição axial da placa de orifício na seção de testes. Além do mais, é esperado que o escoamento intermitente introduza um comportamento pulsátil nas propriedades do escoamento devido a passagem alternada de pistões de líquido e bolhas de gás através da placa de orifício.

Portanto, define-se o objetivo principal deste trabalho: fornecer dados experimentais e realizar um estudo fundamental das propriedades do escoamento bifásico de água e ar no padrão intermitente através de uma placa de orifício. Buscando preencher lacunas existentes em relação aos estudos anteriores, traçam-se os objetivos específicos:

- caracterização do comportamento pulsátil do escoamento nas propriedades do escoamento intermitente;
- estudar a influência da placa de orifício na formação do escoamento intermitente;
- caracterizar os efeitos locais na vizinhança do orifício;
- avaliar a influência nas propriedades do escoamento referente à contração de área e à posição da placa de orifício na seção de testes.

As propriedades avaliadas neste trabalho são: pressão, fração de vazio, velocidade de translação do nariz da bolha alongada e frequência de passagem de golfadas.

## 1.1 Estrutura da Dissertação

- **Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica:** primeiramente apresentam-se estudos com foco no desenvolvimento de modelos para estimar perda de pressão e fluxo através de placas de orifício. Em seguida, destacam-se estudos relacionados ao padrão intermitente e suas propriedades através de placas de orifício.
- **Capítulo 3 - Aparato Experimental e Processamento de Dados:** é descrito o aparato experimental, placas de orifício utilizadas, instrumentação, monitoramento dos fluidos de testes, aquisição de dados, procedimento experimental e processamento dos dados.
- **Capítulo 4 - Resultados:** o capítulo inicia-se com a apresentação das condições operacionais, seguido de uma análise qualitativa das imagens fotográficas. Após, apresentam-se, respectivamente, resultados referente à pressão, fração de vazio, velocidade de translação do nariz da bolha alongada e frequência de passagem de golfadas.
- **Capítulo 5 - Conclusões:** apresentam-se as conclusões obtidas e sugestões para trabalhos futuros.
- **Apêndice A - Análise de Incertezas:** calculam-se as incertezas das propriedades estudadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros trabalhos estão focados na perda de pressão causada pela obstrução e sua modelagem matemática. Murdock (1962) foi um dos pioneiros no desenvolvimento de correlações para a perda de pressão bifásica em uma placa de orifício, utilizando a teoria dos multiplicadores bifásicos de Lockhart e Martinelli (1949) definidos na Equação 2.1:

$$\phi_{L0}^2 = \frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{L0}}, \quad \phi_{G0}^2 = \frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{G0}}, \quad X^2 = \frac{\Delta P_{L0}}{\Delta P_{G0}}, \quad (2.1)$$

onde  $\Delta P_{TP}$ ,  $\Delta P_{G0}$  e  $\Delta P_{L0}$  representam, respectivamente, as perdas de pressão bifásicas, perdas de pressão para escoamentos monofásicos de gás e perdas de pressão para escoamentos monofásicos de líquido através da obstrução;  $\phi_{G0}^2$  e  $\phi_{L0}^2$  são os multiplicadores bifásicos para gás e líquido e  $X^2$  é o parâmetro de Lockhart e Martinelli (1949).

Murdock (1962) testou para escoamento horizontal diversas combinações de fluidos através de placas de orifício com razões de contração de área de 0,063 e 0,250 em tubulações de diâmetros internos de 63 mm, 76 mm e 102 mm. Murdock (1962) plotou  $\sqrt{\Delta P_{TP}/\Delta P_{G0}}$  em função de  $\sqrt{\Delta P_{L0}/\Delta P_{G0}}$  e através do método dos mínimos quadrados ajustou os dados em uma função linear encontrando uma constante de 1,26, conforme Equação 2.2. Como premissa, o modelo de Murdock (1962) considera escoamento incompressível através da obstrução. Não levou-se em consideração o padrão de escoamento e os dados possuem desvios de  $\pm 0,75\%$ . A equação para fluxo mássico bifásico através do orifício está disponível em Murdock (1962).

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{G0}}} = 1,26 \sqrt{\frac{\Delta P_{L0}}{\Delta P_{G0}}} + 1. \quad (2.2)$$

James (1965) propõe correlações derivadas de Murdock (1962) com ajustes empíricos. O modelo é independente de padrão de escoamento e considera as fases incompressíveis na obstrução. A seção de testes utiliza água e vapor de água como fluidos de trabalho. Uma placa de orifício com furo concêntrico e bordas quadradas com uma razão de contração de área de 0,50 é utilizada. O autor correlaciona a perda de pressão com o fluxo bifásico através das correlações na Equação 2.3:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{G0}}} = \frac{1}{x} \sqrt{\frac{x^{1,5}v_G + (1-x)v_L}{v_G}}, \quad (2.3)$$

onde  $v_G$  e  $v_L$  são os volumes específicos das fases gasosa e líquida em  $ft^3/lb$  e  $x$  é a

qualidade da mistura/título mássico.

Lin (1982), baseado no modelo de fases separadas, propôs correlações para estimar a qualidade do vapor e a vazão através de uma placa de orifício com furo concêntrico e bordas quadradas. O fluido de trabalho foi R-113. A linha de testes é horizontal, com diâmetro interno de 32 mm. Os diâmetros dos orifícios são de 10 mm, 14,05 mm e 20 mm, gerando razões de contração de área de 0,10, 0,20 e 0,39, respectivamente. As razões entre a pressão de trabalho e a pressão crítica,  $P/P_c$  foram de 0,5698, 0,7108, 0,7401 e 0,8319 resultando em quatro respectivas razões de densidades,  $\rho_G/\rho_L$ , de: 0,1425, 0,2150, 0,2450 e 0,3280.

A correlação proposta para estimar a perda de pressão é apresentada na Equação 2.4:

$$\sqrt{\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{L0}}} = \theta + x \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - \theta \right), \quad (2.4)$$

onde  $\theta$  é um parâmetro adimensional e  $\rho_G$  e  $\rho_L$  são as massas específicas das fases gasosa e líquida.

O autor plotou  $\theta$  em função de  $\rho_G/\rho_L$ . Os valores encontrados para  $\theta$  foram de 0,900, 0,935, 0,975 e 0,900 para  $\rho_G/\rho_L$  de 0,1425, 0,2150, 0,2450 e 0,3280, respectivamente. Lin (1982), a partir da Equação 2.4, estima o fluxo mássico bifásico com um erro RMS de 12%.

Chisholm (1983) realiza uma completa revisão de escoamentos de duas fases através de placas de orifício. O autor introduz o conceito de placa de orifício de espessura fina, do inglês *thin plate* e placa de orifício de espessura grossa, *thick plate*. O critério para definir uma placa de orifício fina ou grossa é a razão entre sua espessura,  $t_o$ , e o diâmetro do orifício,  $d$ . Para  $t_o/d \leq 0,50$  considera-se placa fina, caso contrário, placa grossa. Este é um critério de extrema importância pois o comportamento da pressão ao longo da obstrução muda. A Figura 2.1, extraída de Chisholm (1983), ilustra a diferença no sinal da pressão através de uma placa de orifício fina e placa de orifício grossa.

As placas de orifício utilizadas neste trabalho são placas de espessura finas e são apresentadas na Seção 3.2, portanto foca-se a análise na Figura 2.1a. Nota-se que antes da obstrução a pressão apresenta um leve aumento em seu valor, denominado *overshoot*. Logo após a passagem do escoamento pelo orifício, ocorre um *undershoot*, onde a pressão atinge um valor mínimo no respectivo local e depois é recuperada. Denomina-se "perda de pressão bifásica" o valor medido após sua recuperação, identificado na figura por  $\Delta P_{TP}$ . Para a "pressão diferencial bifásica" na placa de orifício, utiliza-se a nomenclatura  $\Delta P_o$  e considera-se o valor medido entre o *overshoot* e o *undershoot*.

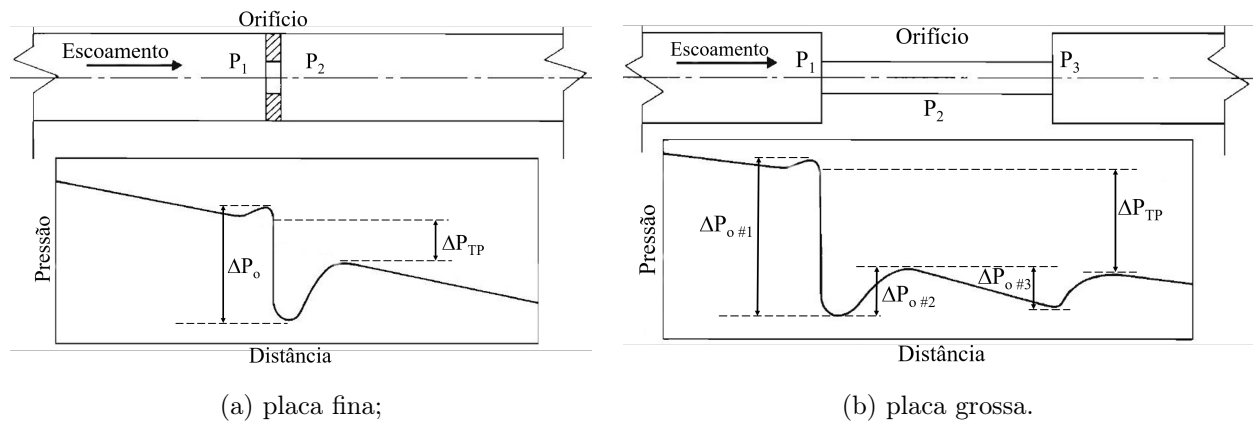


Figura 2.1: Pressão ao longo de uma placa de orifício fina e placa de orifício grossa.  
Fonte: Chisholm (1983).

No modelo proposto por Chisholm (1983), o autor considera ambas as fases incompressíveis. A correlação proposta apresenta a inclusão da tensão interfacial entre as fases, é independente de padrão de escoamento e está exposta na Equação 2.5:

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{L0}} = 1 + \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right) \{ Bx(1-x) + x^2 \}, \quad (2.5)$$

onde  $\Delta P_{L0}$  é a perda de pressão assumindo todo o escoamento sendo líquido e o coeficiente  $B$  assume o valor de 0,50 para placas de orifício finas e 1,50 para placas de orifício grossas.

Salcudean, Groeneveld e Leung (1983) avaliaram o comportamento da perda de pressão para obstruções com seis diferentes geometrias. As obstruções testadas correspondem à uma razão de contração de área de 0,60 e 0,75 para cada geometria. A seção de testes corresponde à uma tubulação de 25,4 mm de diâmetro interno e 118 D de comprimento. As medidas de perda de pressão foram obtidas para escoamento monofásico e para escoamento bifásico no regime anular. A velocidade superficial da água,  $J_L$ , foi de 0,60 m/s e para o ar,  $J_G$ , de até 29 m/s. Os autores concluíram que a obstrução que bloqueia a maior seção da fase líquida causa a maior perda de pressão localizada.

As investigações a respeito das propriedades do escoamento bifásico na presença de uma placa de orifício iniciaram com Salcudean, Chun e Groeneveld (1983). Os autores investigaram as mudanças nos perfis de fração de vazio através de duas diferentes geometrias. Uma das geometrias corresponde à uma placa de orifício com uma razão de contração de área de 0,75.

Os experimentos bifásicos foram conduzidos para os regimes de bolhas, intermitente e anular. A seção de testes e os fluidos de trabalho são os mesmos utilizados em Salcudean, Groeneveld e Leung (1983) e uma sonda ótica foi utilizada para captar a fração de vazio. Os resultados mostraram que logo à jusante da obstrução ocorre uma grande alteração no perfil de fração de vazio, gerando intensa mistura das fases. Ainda à jusante da placa

de orifício, a turbulência induzida pela presente obstrução causa quebra das bolhas e uma forte recirculação de fluidos, devido a presença de ar na parte inferior dos perfis de fração de vazio coletados pelos autores.

Tapucu et al. (1989) estimou a perda de pressão em placas de orifício aplicando razões de contração de área que variam entre 0,79 até 0,39. Os autores empregaram as equações unidimensionais da conservação da massa, momento e energia atrelando às irreversibilidades causadas pelas singularidades após o estágio de expansão.

Kojasoy et al. (1997) modelam o multiplicador bifásico para escoamentos através de placas de orifício finas e grossas utilizando o modelo de deslizamento. A correlação proposta é independente de padrão de escoamento. Com o objetivo de validar o modelo, uma seção de testes foi construída. O fluido de testes foi o gás R-113. Ao comparar os resultados experimentais com os resultados analíticos o erro encontrado foi de  $\pm 20\%$ .

Oliveira et al. (2009) investigaram as alterações nas propriedades do escoamento de ar e de água através de uma placa de orifício e de um venturi nos arranjos vertical ascendente e horizontal. A tubulação possui 21 mm de diâmetro interno e a singularidade encontra-se 95 D à jusante do injetor. Um sensor de fração de vazio, calibrado através de válvulas de fechamento rápido, localiza-se 20 D à montante da obstrução, tanto para os arranjos vertical quanto horizontal. A razão de contração de área utilizada foi de 0,25 e os padrões de escoamento testados foram bolhas, intermitente, agitante e anular. Os autores concluíram que para o mesmo medidor de vazão (placa de orifício ou venturi), tanto para escoamento horizontal e vertical, a perda de pressão na singularidade é similar, independente da atuação do campo gravitacional. Os desvios encontrados na estimativa da vazão bifásica através das obstruções estão entre 5% e 10%.

Alguns estudos relacionam a perda de pressão com a estrutura do escoamento próximo da obstrução, devido à suspeita de que o escoamento é modificado nas proximidades da placa de orifício. As respectivas alterações das propriedades na vizinhança da obstrução estão relacionadas com o padrão do escoamento, portanto os modelos até então existentes são questionáveis, uma vez que são independentes de padrão. A breve revisão a seguir aplica-se somente aos estudos que incluem o padrão intermitente, que é o padrão investigado neste trabalho.

Owen e Hussein (1994) investigaram o impacto do pistão de líquido em uma placa de orifício bem como sua passagem através da respectiva obstrução. Os diâmetros internos da seção de testes são de 28 mm e 50 mm e os testes foram conduzidos com ar e água. Para o diâmetro interno de 28 mm os autores testaram três razões de contração de área: 0,500, 0,375 e 0,250. Os autores atestaram que o pistão de líquido tem sua velocidade reduzida a partir do seu primeiro impacto com a obstrução. Além do mais, evidenciaram que o pistão de líquido é "*extrudado*" durante sua passagem pela placa de orifício, gerando um jato de líquido.

Fossa e Guglielmini (2002) investigaram os perfis de perda de pressão e de fração

de vazio através de placas de orifício finas e grossas. A seção de testes trata-se de uma tubulação horizontal com diâmetros internos de 40 mm ou 60 mm e 12 m de comprimento, resultando, respectivamente, em 300 D e 200 D. Os fluidos de teste são ar e água e a placa de orifício com furo concêntrico e bordas quadradas localiza-se 6 m à jusante do injetor. As velocidades superficiais da fase gasosa estão entre 0,30 m/s e 4 m/s e da fase líquida entre 0,60 m/s e 2 m/s. As razões de contração de área utilizadas são de 0,73 e 0,54. Os autores evidenciaram que a fração de vazio sofre um aumento em seu valor médio logo em 1 D à jusante da obstrução, sendo geralmente o máximo valor para fração de vazio medido ao longo da seção de testes. Tal fenômeno apresenta maior evidência a medida que a razão de contração de área decresce. Com relação a perda de pressão, os autores sugerem a correlação de Chisholm (1983) exposta na Equação 2.5 para placas de orifício grossas. Já para placas finas, sugere-se a correlação de Morris (1985), exposta na Equação 2.6, apesar de ser uma correlação independente de padrão de escoamento.

$$\frac{\Delta P_{TP}}{\Delta P_{L0}} = \left[ x \frac{\rho_L}{\rho_G} + S(1-x) \right] \times \left[ x + \left( \frac{1-x}{S} \right) \left( 1 + \frac{(S-1)^2}{\sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G} - 1}} \right) \right], \quad (2.6)$$

onde o escorregamento,  $S$ , é calculado através da Equação 2.7:

$$S = \sqrt{1 + x \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} - 1 \right)}. \quad (2.7)$$

Bertola (2002) utilizou uma sonda óptica para coletar dados a respeito da fração de vazio na presença de uma contração abrupta. A seção de testes trata-se de uma contração com bordas quadradas, onde a seção à montante da contração possui 80 mm de diâmetro e 7 m de comprimento dispostos horizontalmente. Após a singularidade, a seção é modificada para um diâmetro interno de 60 mm e 5 m de comprimento, resultando em uma razão de contração de área de 0,56. O padrão investigado é o intermitente e os fluidos de trabalho são ar e água. O autor evidencia que a contração altera a distribuição das fases líquida e gasosa tanto à montante quanto à jusante da singularidade. Ele atesta que próximo da contração ocorre a queda na fração de vazio. Longe da singularidade, tanto à montante quanto à jusante, as medidas de fração de vazio se mantiveram constantes. Nota-se uma queda nos valores médios de fração de vazio 1,1 D à montante da contração. As perturbações da contração são sentidas aproximadamente até 30 D à montante da singularidade.

Bertola e Moschella (2003) investigaram experimentalmente a velocidade de translação do nariz da bolha e a altura de filme de líquido logo à montante de uma contração (1,1 D) e compararam com escoamento em tubo livre no mesmo diâmetro da seção de testes. A bancada experimental é a mesma utilizada em Bertola (2002). O padrão de escoamento



estudado é o intermitente e os fluidos são água e ar. A velocidade de translação do nariz da bolha à montante da contração mostrou-se 20% menor que para o tubo livre, em comparação com as mesmas velocidades superficiais. Referente a fração de vazio, coletada 1,1 D à montante da contração, encontrou-se que para baixas velocidades superficiais de gás,  $J_G$ , a altura de filme de líquido é maior que para o tubo reto. Conforme  $J_G$  aumenta, a altura de filme decresce, tornando-se menor que para o tubo reto.

Tanto em Bertola (2002) quanto em Bertola e Moschella (2003), os autores sugerem não utilizar correlações para estimar a perda de pressão e fração de vazio na presença de obstruções a partir de correlações para escoamento em tubo livre, uma vez que irá acarretar em grandes erros na vizinhança da obstrução, pois o escoamento é modificado em sua proximidade.

Fossa, Guglielmini e Marchitto (2006) utilizaram um sensor de impedância composto por múltiplos anéis para investigar o comportamento da fração de vazio à montante e à jusante na presença de uma placa de orifício. O aparato experimental, os fluidos de testes, o padrão de escoamento e as razões de contração de área já estão descritos em Fossa e Guglielmini (2002). A alteração na configuração experimental está na tubulação, onde somente o diâmetro de 40 mm foi utilizado. Após 1 D da obstrução, os autores mostram que a fração de vazio atinge um valor máximo, que pode ser até duas vezes o valor encontrado para fração de vazio longe da obstrução considerando um escoamento totalmente desenvolvido. O aumento da fração de vazio logo após a obstrução mostrou-se dependente da razão de contração de área.

Zeghloul et al. (2015) avaliaram experimentalmente a fração de vazio em um escoamento de água e ar vertical ascendente. A seção de testes possui um diâmetro interno de 34 mm e 176 D de comprimento. As razões de contração de área utilizadas foram de 0,53 e 0,29 com razões  $t_o/d$  de 0,10, 0,20 e 0,59 (duas placas finas e uma placa grossa) para cada razão de contração de área. A singularidade localiza-se 121 D à jusante do injetor e dez sondas de impedância foram dispostas ao longo da seção de testes. Os padrões testados foram bolhas, intermitente e agitante. As principais conclusões dos autores são que a frequência de passagem para o regime bolhas e intermitente são similares à montante e à jusante da obstrução. A placa de orifício altera significativamente a estrutura do escoamento em sua vizinhança e os comprimentos para recuperação à jusante das condições encontradas à montante são de 20 D, 10 D e 7 D para os regimes de bolhas, intermitente e anular, respectivamente.

Apesar do recente aumento no número de estudos referente à escoamento multifásico na presença de obstruções, pouco sabe-se como a placa de orifício modifica as propriedades do escoamento. Busca-se no presente estudo, fornecer dados experimentais para auxiliar na compreensão das alterações induzidas pela placa de orifício nas propriedades do escoamento intermitente. Empregam-se análises qualitativas e quantitativas de propriedades como pressão, fração de vazio, velocidade de translação do nariz da bolha alongada e

frequência de passagem de golfadas.

### 3. APARATO EXPERIMENTAL E PROCESSAMENTO DE DADOS

Nas Seções 3.1 e 3.2 serão apresentados a descrição do aparato experimental e detalhes sobre as placas de orifício utilizadas. As seções 3.3, 3.4 e 3.5 descrevem a instrumentação, o sistema de monitoramento dos fluidos de teste e sistema de aquisição de dados, respectivamente. Por fim, nas Seções 3.6 e 3.7 são apresentados o procedimento experimental e o processamento de dados.

#### 3.1 Descrição do Aparato Experimental

O aparato experimental localiza-se na Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) da Universidade Estadual de Campinas. O laboratório pertence ao Two-Phase Flow Group (2PFG) e é utilizado na pesquisa de escoamento multifásico.

A Figura 3.1 apresenta um desenho esquemático do aparato experimental, separado em três partes:

- em verde: linha de líquido;
- em azul: linha de ar comprimido;
- em vermelho: seção de testes.

A linha de gás é composta por três compressores com vazão volumétrica máxima de  $0,085 \text{ Nm}^3/\text{s}$  e pressão máxima de operação de  $1206,6 \text{ kPa}$ . Após passar por um filtro de ar, o ar comprimido é armazenado em um reservatório de  $4 \text{ m}^3$ . Do reservatório, o ar passa por uma válvula reguladora, ajustada para a pressão de  $600 \text{ kPa}$ . Após passar pela válvula, o ar é admitido em um reservatório de ar com capacidade de  $0,2 \text{ m}^3$ , identificado na Figura 3.2b.

Após o reservatório, uma válvula agulha de passo controlada remotamente e uma válvula agulha com operação manual, expostas na Figura 3.2c, são utilizadas na quebra da pressão e regulagem da vazão gás. Como medidor de vazão de gás, um bocal sônico foi utilizado. O bocal sônico é feito de alumínio e possui um furo concêntrico de  $0,6 \text{ mm}$  de diâmetro. Um termopar e duas tomadas de pressão, uma à montante,  $P_0$  (pressão de estagnação), e outra à jusante,  $P_b$ , são posicionados junto ao bocal sônico. É possível verificar em Fox e McDonald (2000) que, utilizando a teoria do escoamento sônico, a vazão de gás é constante à jusante do bocal para uma razão de pressão  $P_b/P_0$  menor que  $0,528$ . Após passar pelo bocal sônico, o ar é descarregado na seção de testes.

A linha de líquido tem início no tanque de armazenamento com capacidade de  $3,0 \text{ m}^3$ . Um inversor de frequência é utilizado para operar a bomba centrífuga de alimentação

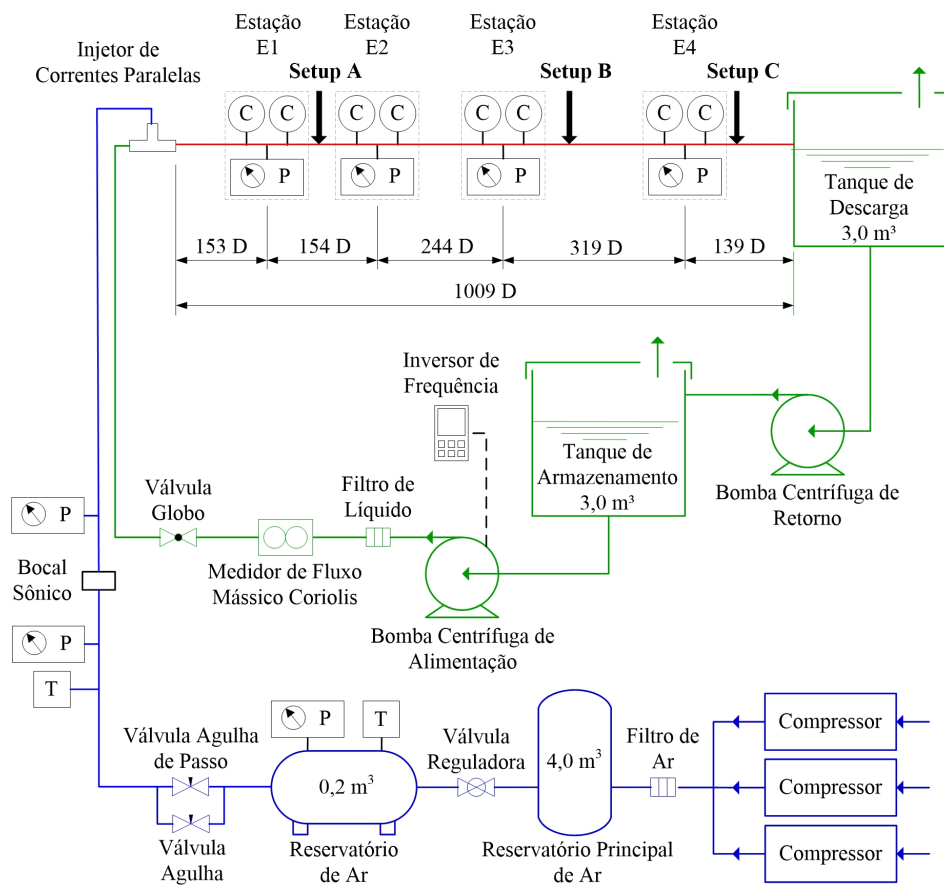


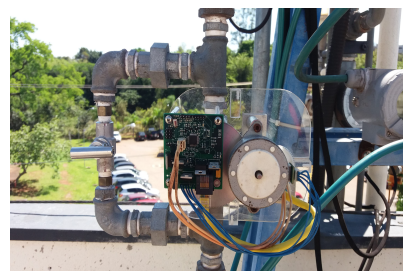
Figura 3.1: Desenho esquemático do aparato experimental, adaptado de Dalla Maria (2016).



(a) bocal sônico;



(b) reservatório de ar;



(c) válvula de passo de agulha e válvula agulha;

Figura 3.2: Componentes da linha de ar comprimido.

(Figura 3.3b) fabricada pela KSB, modelo Meganorm Bloc 25-150. A bomba conduz a água através de um filtro (Figura 3.3a) para eliminar impurezas, que segue para um medidor de fluxo mássico (Figura 3.3c) do tipo Coriolis modelo RHM15, do fabricante Metroval. Após a medição da vazão de líquido, o fluido passa por uma válvula globo parcialmente fechada que tem como objetivo reduzir as flutuações na vazão, antes de ser admitido na seção de testes.



(a) filtro de água;



(b) bomba centrífuga de alimentação;



(c) medidor de fluxo mássico;

Figura 3.3: Componentes da linha de líquido.



Figura 3.4: Injetor gás-líquido.

A seção de testes consiste de uma tubulação disposta horizontalmente, com comprimento de 26,24 m e constituída de tubos lisos de acrílico com diâmetro interno de 0,026 m. O gás e o líquido são injetados na seção de testes através de um injetor gás-líquido de correntes paralelas, detalhado na Figura 3.4. O ar é admitido na parte superior e a água na parte inferior do injetor, que é dividido por uma placa de acrílico horizontal com



0,26 m de comprimento. A linha de testes se encerra no tanque de descarga, onde o ar comprimido é ventilado para a atmosfera e a água, livre de bolhas, é bombeada para o tanque de armazenamento através da bomba centrífuga de retorno.

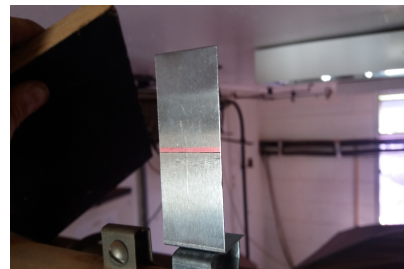
A seção de testes, identificada pela linha vermelha na Figura 3.1, possui quatro estações de medição localizadas 3,98 m, 7,98 m, 14,32 m e 22,62 m à jusante do injetor gás-líquido. As estações também serão identificadas neste trabalho através de sua distância adimensional ( $z/D$ ), sendo  $z$  a distância em metros entre a respectiva estação e o injetor gás-líquido e  $D$  o diâmetro interno da seção de testes. As distâncias adimensionais  $z/D = 153, 307, 551$  e  $870$  correspondem, respectivamente, às estações de medição E1, E2, E3 e E4.



(a) laser posicionado na altura da linha de testes;



(b) alinhamento próximo à estação 3;



(c) gabarito para alinhamento;



(d) alinhamento externo, próximo à estação 4;

Figura 3.5: Nivelamento à laser da seção de testes.

Cada estação possui um transdutor de pressão e um par de sondas de haste, detalhadas em Rosa e Souza (2015). As sondas de haste possuem um espaçamento de 0,1125 m entre si e a tomada de pressão localiza-se no ponto médio. O transdutor de pressão é responsável por registrar a evolução temporal da pressão e as sondas capturam a ocorrência de líquido e gás. Os sinais das sondas de haste, após o processamento, permitirão

identificar a velocidade de translação do nariz da bolha, os comprimentos do pistão de líquido e da bolha, a frequência de passagem, altura de filme de líquido e posteriormente a fração de vazio.

Para garantir a leitura correta da sonda de haste e minimizar ao máximo a influência estrutural nos resultados, executa-se um alinhamento à laser na seção de testes, como mostra a Figura 3.5. O procedimento de alinhamento inclui posicionar o laser na altura da tubulação de acrílico, utilizando a altura do injetor gás-líquido como referência. Após o posicionamento, os gabaritos mostrados na Figura 3.5c são instalados e a altura é regulada através dos suportes nos quais os tubos de acrílico que compõe a seção de testes estão fixados. Quando o traço do laser coincidir com a marca do gabarito, a altura de referência foi atingida. O alinhamento da seção de testes permitiu uma melhor leitura na altura de filme de líquido, propriedade importante na análise deste trabalho. O erro máximo de leitura na altura do filme de líquido é de  $\pm 1$  mm.

## 3.2 Placas de Orifício

É investigado neste trabalho o escoamento bifásico de água e ar através de placas de orifício testadas individualmente. A placa de orifício é um disco de aço inoxidável com 0,003 m de espessura, dotado de um furo circular simples e concêntrico com bordas quadradas. Nesta seção retomamos o conceito de razão de contração de área e repetimos a Equação 1.1 por conveniência:

$$\sigma = \left( \frac{d}{D} \right)^2. \quad (1.1)$$

Os diâmetros utilizados nos orifícios são: 0,013 m, 0,0091 m e 0,007 m, resultando em razões de contração de área de 0,250, 0,123 e 0,072, respectivamente. A Figura 3.6 apresenta as placas de orifício utilizadas.

Pelo critério de Chisholm (1983), uma placa de orifício é considerada “fina” quando a razão entre sua espessura  $t_o$  e seu diâmetro  $d$  é menor que 0,5 ( $t_o/d < 0,5$ ). Para as razões de contração de área de 0,250, 0,123 e 0,072 temos os respectivos valores: 0,231, 0,330 e 0,429, portanto todas as placas de orifício utilizadas são placas finas.

Substituiu-se um segmento da seção de testes por uma seção de tubo com dois cubos de acrílico posicionados entre uniões rosqueadas, detalhado na Figura 3.7. Os cubos possuem um furo passante com diâmetro de 0,026 m, idêntico ao da seção de testes e são unidos por duas barras roscadas de 0,004 m de diâmetro.

Um rebaixo de 0,0015 m foi feito em uma das faces de cada cubo, permitindo que a placa de orifício com 0,003 m de espessura, encaixe perfeitamente. Para evitar vazamentos foram preenchidas com anéis de vedação de borracha as interfaces placa de orifício-cubo e cubo-tubo.

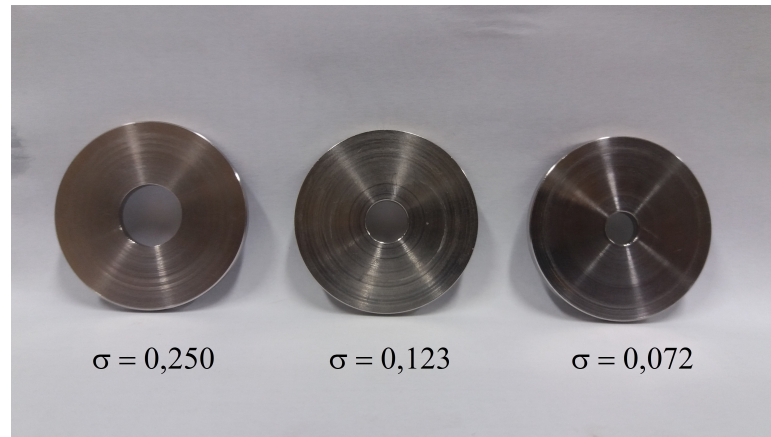


Figura 3.6: Placas de orifício utilizadas e as respectivas razões de contração de área.

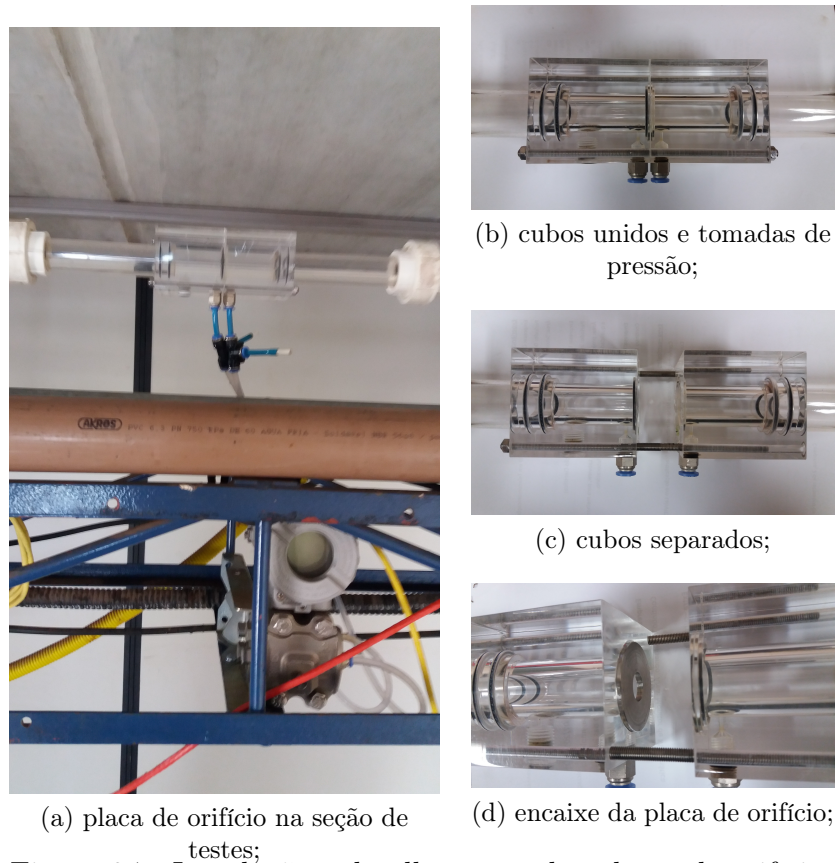


Figura 3.7: Instalação e detalhamento das placas de orifício.

Duas tomadas de pressão foram instaladas, uma 0,008 m à montante e outra 0,008 m à jusante da placa de orifício e cada uma das tomadas de pressão corresponde a um furo de 0,002 mm. Um transdutor de pressão foi posicionado com o objetivo de coletar dados experimentais a respeito da diferença de pressão na obstrução singular.

Três posições axiais ao longo da seção de testes foram escolhidas para posicionar a placa de orifício. Essas posições podem ser verificadas na Figura 3.1 e são identificadas pelos *setups* A, B e C. Os *setups* A, B e C estão localizados 169 D, 632 D e 886 D à



jusante do injetor, correspondendo respectivamente, a 4,39 m, 16,43 m e 23,04 m. Em cada *setup*, uma a uma, as três razões de contração de área foram testadas.

A Tabela 3.1 expõe as distâncias relativas ao injetor gás-líquido ou relativas à posição da placa de orifício nos *setups* A, B e C, com valores negativos indicando à montante e valores positivos indicando à jusante do ponto de referência, na tabela identificado pelo número 0. Por exemplo: a linha do injetor informa que a placa de orifício no *setup* A está localizada 169 D à jusante do injetor gás-líquido. A linha do *setup* C indica que a estação de medição 3 localiza-se 335 D à montante da placa de orifício, devido seu sinal negativo.

Tabela 3.1: Distâncias entre injetor gás-líquido, estações de medição e placas de orifício a partir de diferentes referências.

<b>Distâncias</b>	<b>Injetor</b>	<b>E1</b>	<b>A</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>B</b>	<b>E4</b>	<b>C</b>	<b>Saída</b>
Do injetor	<b>0</b>	153 D	169 D	307 D	551 D	632 D	870 D	886 D	1009 D
Do <i>setup</i> A	-169 D	-16 D	<b>0</b>	138 D	382 D	-	701 D	-	840 D
Do <i>setup</i> B	-632 D	-479 D	-	-325 D	-81 D	<b>0</b>	238 D	-	377 D
Do <i>setup</i> C	-886 D	-733 D	-	-579 D	-335 D	-	-16 D	<b>0</b>	123 D

### 3.3 Instrumentação

Os sensores utilizados nos experimentos foram:

Na seção de testes:

- transdutores de pressão modelos LD 301 fabricado pela SMAR e PX-750 fabricado pela OMEGA;
- sondas de haste desenvolvida pelo grupo de pesquisa 2PFG.

Na placa de orifício:

- transdutor de pressão modelos LD 301 fabricado pela SMAR;
- sonda de contato desenvolvida pelo grupo de pesquisa 2PFG.

No bocal sônico:

- transdutor de pressão modelos LD 301 fabricado pela SMAR;
- transmissor de temperatura modelo TT301, fabricado pela SMAR, acoplado a um termopar tipo T.

### 3.3.1 Sonda de Haste e Sonda de Contato

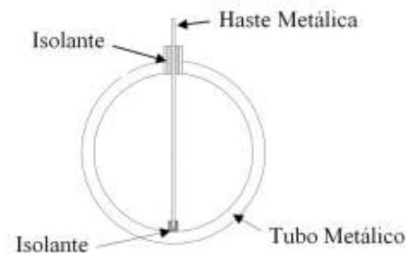
O princípio de funcionamento das sondas utilizadas nos experimentos é a diferença de resistência elétrica oferecida pelos fluidos de teste. O circuito eletrônico possui um sinal senoidal de saída com frequência de oscilação de 100 kHz, conforme Rosa e Souza (2015). As sondas empregadas neste trabalho são as sondas de haste e a sonda de contato, que compartilham o mesmo circuito eletrônico.

A sonda de haste é composta por uma pequena haste maciça de aço inoxidável com 0,6 mm de diâmetro. A haste é posicionada verticalmente no centro de um tubo de aço galvanizado e isolada eletricamente nas extremidades superior e inferior, evitando influência do meio externo. A haste metálica possui uma intrusão correspondente à 3% da área da seção transversal da linha de testes, de acordo com Rosa e Souza (2015).

Com a sonda de haste, é possível medir níveis de líquido em escoamentos no regime estratificado e intermitente, considerando um filme de líquido com interface plana.



(a) sonda de haste em uma estação de medição;



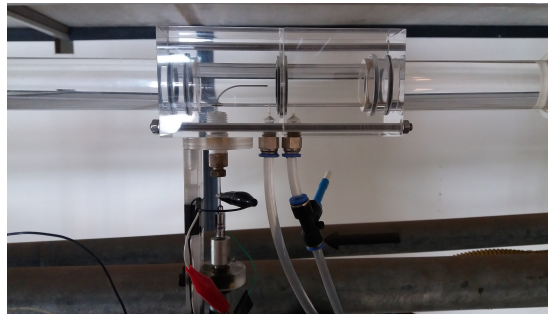
(b) desenho esquemático da sonda de haste;

Figura 3.8: Detalhamento da sonda de haste. Fonte: (b) em Dalla Maria (2016).

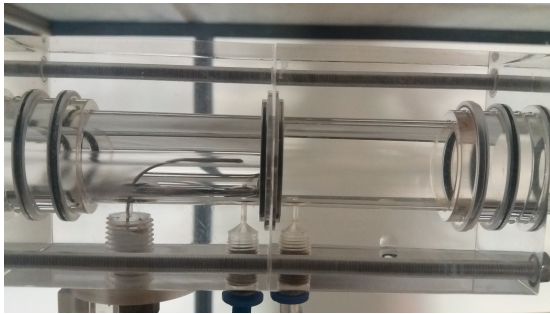
A Figura 3.8 apresenta as sondas de haste instaladas na seção de testes e seu respectivo desenho esquemático. Em cada uma das quatro estações de medição, as sondas de haste estão dispostas em pares e são espaçadas de 0,1125 m.

A sonda de contato é composta por um fio de ouro com diâmetro de  $108 \mu m$  e com a face perpendicular ao escoamento. O fio de ouro é inserido em uma agulha de aço inoxidável com diâmetro externo de  $900 \mu m$ , que tem por finalidade aterrar a sonda e dar suporte estrutural ao fio de ouro contra o escoamento. A leitura da sonda de contato é local e um micrômetro é utilizado para regular sua posição radial dentro da tubulação. Maiores detalhes referente às sondas de haste e de contato estão presentes em Rosa e Souza (2015).

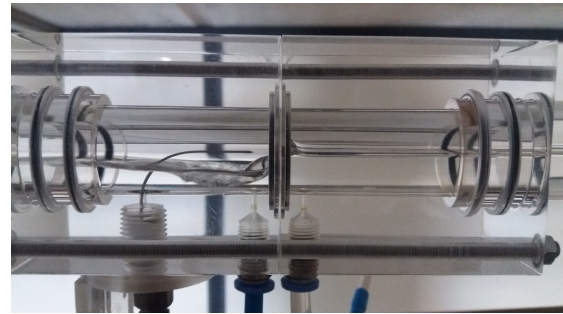
A Figura 3.9a mostra a sonda de contato posicionada na seção de testes. O ponto de leitura da sonda está localizado  $0,31 D$  (7,8 mm) à jusante da placa de orifício no *setup* B. O objetivo é ilustrar em sincronia, a pressão diferencial instantânea na placa de orifício juntamente com a mistura que escoar pelo orifício. O sinal de saída da sonda de contato é



(a) sonda de contato instalada na seção de testes;



(b) sonda de contato e  $\sigma = 0,072$ ;



(c) sonda de contato e  $\sigma = 0,250$ ;

Figura 3.9: Sonda de contato.

a tensão normalizada  $V^*$ , exposta na Equação 3.1, Seção 3.7. A leitura do sinal da sonda de contato foi realizada somente no *setup* B para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$ .

Percebe-se na Figura 3.9b, com  $\sigma = 0,072$ , que a sonda de contato está no centro do jato proveniente da placa de orifício. Tal comportamento se repetiu para  $\sigma = 0,123$ . Para a passagem da bolha de gás, a mistura bifásica proveniente do orifício também foi captada pela sonda de contato para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$ .

Para  $\sigma = 0,250$  foi possível captar a passagem do pistão de líquido porém durante a passagem da bolha de gás, nota-se que a ponta da agulha está sempre em contato com a fase gasosa, ilustrada na Figura 3.9c. Portanto, desconsidera-se a medição pontual da mistura para  $\sigma = 0,250$ .

### 3.3.2 Transdutor de Pressão

Foram utilizados transdutores de pressão SMAR modelo LD 301 e OMEGA modelo PX-750 no bocal sônico e na seção de testes. Todos os transdutores foram calibrados em fundo de escala com relação à corrente de saída, de 4 a 20 mA. A faixa de operação dos sensores varia de acordo com sua respectiva posição e aplicação na seção de testes. A incerteza absoluta na medida de pressão é de  $\pm 0,10$  kPa.

### 3.3.3 Transmissor de Temperatura

O transmissor de temperatura utilizado no bocal sônico é fabricado pela SMAR, modelo TT301, acoplado a um termopar tipo T. Sua corrente de saída varia de 4 a 20 mA. A faixa de operação do sensor está entre 0 °C e 100 °C, com precisão de  $\pm 0,15$  °C utilizando o termopar tipo T .

### 3.4 Monitoramento dos Fluidos de Teste

O monitoramento dos fluidos de teste é realizado pelo programa computacional Supervisório, apresentado na Figura 3.10, desenvolvido pelo 2PFG. Este módulo é responsável pela verificação e regulagem das velocidades superficiais de líquido,  $J_L$ , e de gás,  $J_G$ , na saída da seção de testes, assim como controlar remotamente a bomba centrífuga de alimentação, verificar as condições de operação do bocal sônico, enviar comandos de abertura e fechamento da válvula de agulha de passo e iniciar a gravação dos dados em sincronia com o sistema de aquisição. Todas essas funções são possíveis através do módulo de leitura e de escrita. O módulo de leitura opera utilizando um ADAM-4017 a uma frequência de amostragem de 1 Hz e adquire os seguintes dados:

- $J_L$  e  $J_G$  na saída da seção de testes, com incertezas de 1,4% e 0,3%, respectivamente;
- Pressão manométrica na linha de ar comprimido;
- Corrente elétrica do medidor de fluxo mássico Coriolis;
- Temperatura do ar;
- Vazão mássica de líquido e gás.

O módulo de escrita é um ADAM-4024, utilizado para enviar comandos remotamente permitindo o controle e operação dos seguintes componentes:

- Válvula de agulha de passo, utilizada para regular a vazão de gás (Figura 3.1);
- Inversor de frequência da bomba centrífuga de alimentação, para regular vazão de líquido.

Os sinais para leitura recebidos pelo módulo ADAM-4017, são enviados ao módulo conversor ADAM-4561 pela rede RS-485. Do módulo conversor, via rede USB, o computador salva os dados. O módulo de escrita possui um caminho inverso. Do computador é enviado o comando de escrita até o inversor de frequência, através do ADAM-4024.

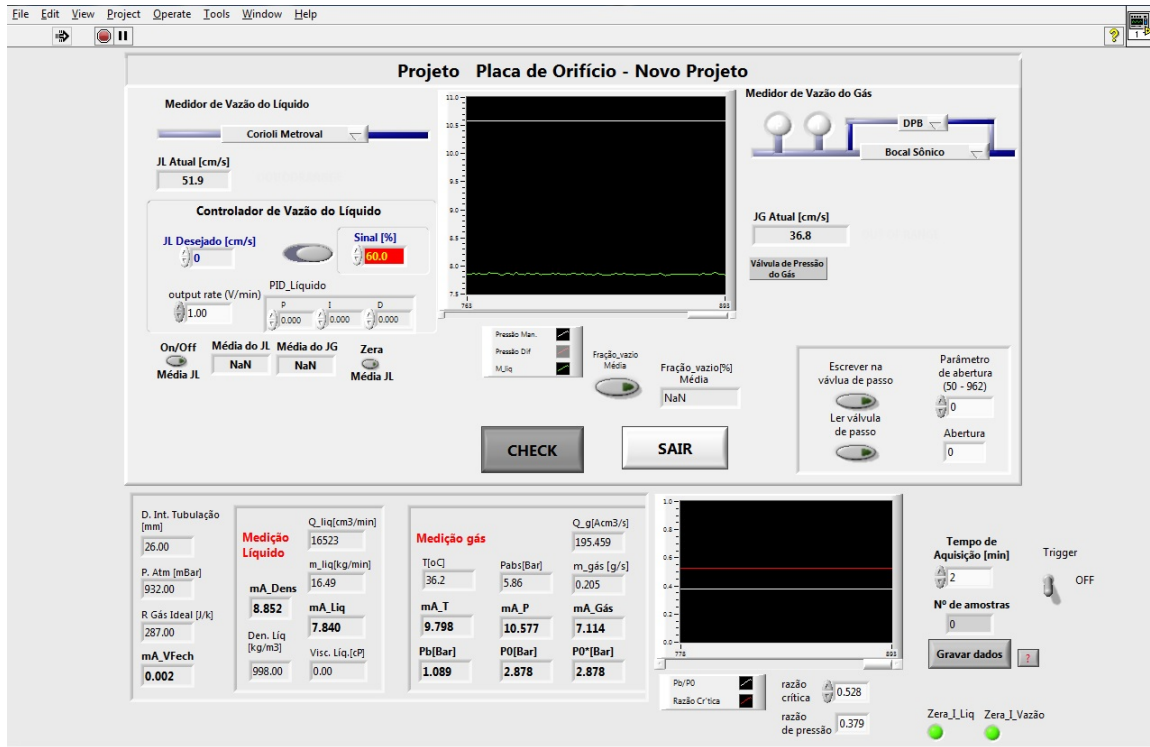


Figura 3.10: Interface do programa Supervisório.

A válvula de agulha de passo possui um caminho exclusivo, onde o comando de escrita é gerado no computador, através da rede USB o comando é enviado ao módulo conversor, do mesmo modelo ADAM-4561, que encaminha o comando para a válvula. Um fluxograma do monitoramento dos fluidos de teste é apresentado na Figura 3.11.

Foi empregado para visualização do escoamento uma câmera de alta velocidade modelo Motion Xtra N3, com resolução máxima de 1280 x 1024 pixels. A lente utilizada é da marca Nikon, modelo AF Nikkor 50mm f/1.4D. A distância focal é fixa de 50 mm e as fotografias foram realizadas com a abertura máxima de f/1.4. A frequência escolhida para as filmagens foi de 200 Hz. O software utilizado para o processamento das imagens é o Motion Studio. O *setup* B foi selecionado para a realização das filmagens e três posições axiais foram escolhidas para dispor a câmera: 501 D, 632 D e 670 D à jusante do injetor gás-líquido.

A primeira posição corresponde à um trecho da seção de testes localizado 131 D à montante da placa de orifício (ou 501 D à jusante do injetor) e tem como intuito visualizar os fenômenos que ocorrem no escoamento antes de passar pela obstrução. A segunda posição, 632 D, corresponde à placa de orifício no *setup* B e a finalidade é visualizar os efeitos da intermitência na passagem do escoamento bifásico pela obstrução para diferentes razões de contração de área. A terceira posição, 670 D, está localizado 38 D à jusante da placa de orifício e tem como objetivo mostrar como o regime intermitente é recuperado após passar pela obstrução, buscando entender o fenômeno de recirculação dos fluidos.

Com o objetivo de capturar no escoamento gás-líquido as mudanças causadas pela

obstrução, procurou-se diminuir o tempo de exposição da câmera. Como plano de fundo das imagens utilizou-se um disco rebatedor e difusor oval de cor branca. Como iluminação de fundo utilizaram-se dois painéis de LED modelo PT-680S com 40 watts de potência e 6.000 lumens cada. Para iluminação frontal utilizaram-se dois canhões de LED. O primeiro canhão modelo T-500BL com 60 watts de potência e 6.000 lumens e o segundo canhão de LED modelo SK-1000SL, com 120 watts de potência e 10.000 lumens. A Figura 3.12 apresenta a filmagem na placa de orifício e 38 D à jusante da obstrução para *setup* B.

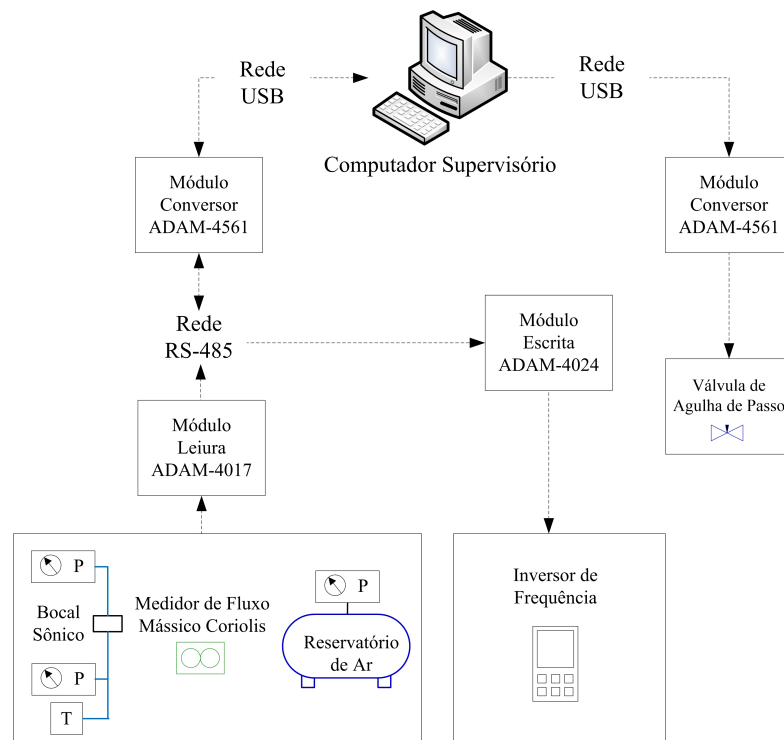


Figura 3.11: Fluxograma do monitoramento dos fluidos de teste.



(a) placa de orifício na seção de testes, *setup* B;



(b) escoamento 38 D à jusante da placa de orifício;

Figura 3.12: Filmagem do escoamento gás-líquido na seção de testes.



### 3.5 Módulo de Aquisição de Dados

Duas placas de aquisição NI 9203 fabricadas pela National Instruments são utilizadas na leitura dos sinais analógicos de corrente elétrica proveniente das sondas e dos transdutores de pressão instalados na seção de testes. As frequências de amostragem utilizadas foram 3 kHz para os transdutores de pressão e para as sondas de haste e 10 kHz para a sonda de contato.

As placas de aquisição NI 9203 estão conectadas ao chassi NI cDAQ-9188, também fabricado pela National Instruments. Os dados são enviados simultaneamente à rede através de uma conexão RJ-45. O valor adquirido de corrente elétrica é convertido virtualmente em tensão elétrica variando entre 1 V e 5 V pelo programa Adquire, desenvolvido pelo 2PFG em ambiente LabView.

O arquivo gerado pelo programa Adquire possui extensão .adq e contém valores de tensão das sondas de haste, sonda de contato e transdutores de pressão localizados nas quatro estações de medição e na placa de orifício. A quantidade de canais utilizados nas placas de aquisição é variável e facilmente alterada com conexões RJ-45.

O programa permite o ajuste da frequência de amostragem, do tempo de aquisição, endereçamento de arquivos gerados bem como a visualização do sinal dos sensores durante os experimentos. A Figura 3.13 apresenta o programa Adquire e sua interface gráfica.

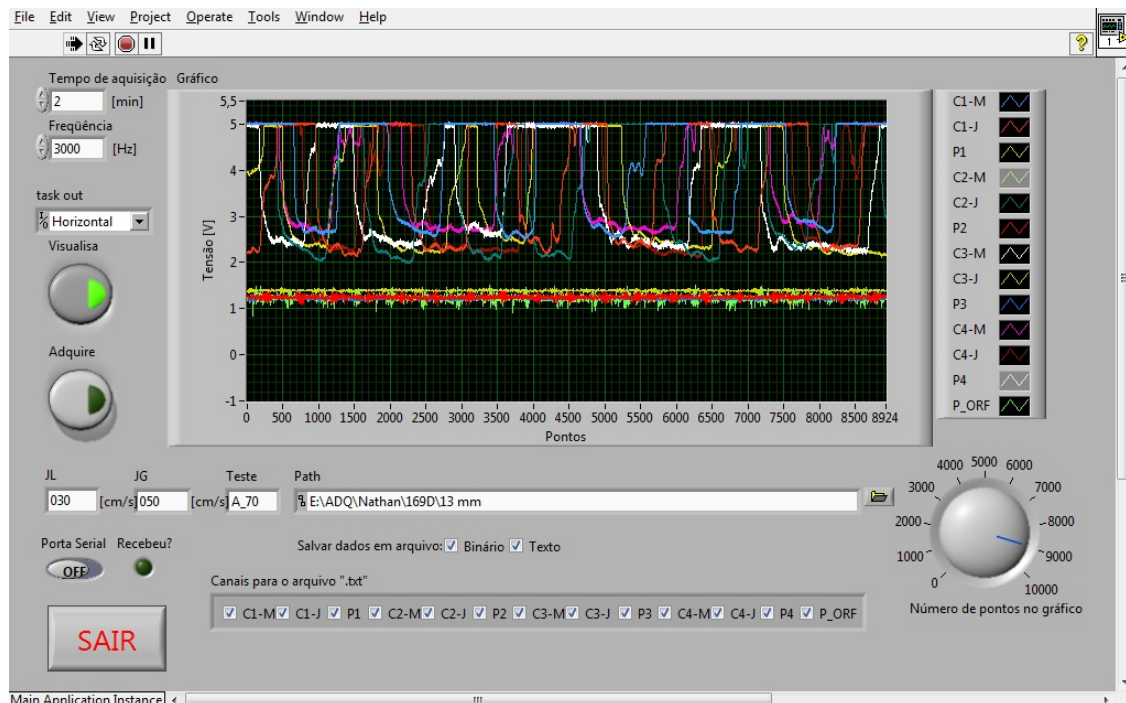


Figura 3.13: Interface do programa Adquire.

### 3.6 Procedimento Experimental

O presente estudo trata da investigação dos efeitos de uma obstrução singular nas propriedades do escoamento bifásico ar-água. Todas as três razões de contração de área foram testadas singularmente nos três *setups* escolhidos. As velocidades superficiais de líquido e de gás selecionadas foram 0,30 m/s e 0,50 m/s, respectivamente.

Devido à compressibilidade do ar, a velocidade superficial de ar na saída da seção de testes é sempre maior que 0,50 m/s. Diferentes valores de velocidade superficial do ar na saída da seção de testes são utilizados conforme o *setup* e a razão de contração de área, para que na estação de medição à montante da placa de orifício seja obtido o valor médio de 0,50 m/s. A velocidade superficial de ar nas estações de medição é corrigida pela razão entre a pressão atmosférica e a pressão na estação, para garantir a compressibilidade. Os valores selecionados para as velocidades superficiais dos fluidos garantem uma boa representatividade de células unitárias dentro da seção de testes.

Os fluidos utilizados nos experimentos foram ar comprimido e água à pressão e temperatura ambiente (93,7 kPa e 25 °C). A densidade e a viscosidade da água são, respectivamente, 998 kg/m<sup>3</sup> e 0,001 Pa.s. A densidade do ar comprimido é calculada considerando-o como um gás ideal.

Tabela 3.2: Grade de testes.

Séries			
Tubo Livre	✓		
$\sigma$	<i>Setup A</i>	<i>Setup B</i>	<i>Setup C</i>
0,250	✓	✓	✓
0,123	✓	✓	✓
0,072	✓	✓	✓

Para avaliar a perturbação da obstrução nas propriedades do escoamento, experimentos com tubo livre foram adicionados como estado de referência. A grade de testes, exposta na Tabela 3.2, é composta por 10 séries, sendo 1 série para o escoamento em tubo livre e 9 séries para as combinações entre razões de contração de área e *setups* A, B e C. Cada série é composta por 10 experimentos, sendo que cada experimento possui uma duração de 120 segundos, totalizando, entre as 10 séries, 100 experimentos.

Para atenuar as flutuações na vazão de líquido, restringe-se o escoamento de água pela válvula globo existente antes do injetor e opera-se a bomba centrífuga de alimentação próximo de sua rotação máxima. Para a vazão de gás, respeita-se a razão de pressão  $P_b/P_0 < 0,528$ , garantindo uma velocidade superficial de gás constante, conforme Seção 3.1. Após configurar as velocidades e aguardar que o escoamento esteja livre dos efeitos transientes devido à partida, se iniciam as aquisições.



A Figura 3.14 ilustra o comportamento das velocidades superficiais de ar (tracejado) e de água (contínua) na saída da seção de testes utilizando  $\sigma = 0,072$  e *setup C*.

Nota-se que a velocidade superficial de gás permanece constante, fator esse alcançado com o uso do bocal sônico como medidor de vazão. A velocidade superficial de líquido, por sua vez, revela pequenas flutuações ao longo do experimento, com valores em torno de 1,5% do valor nominal.

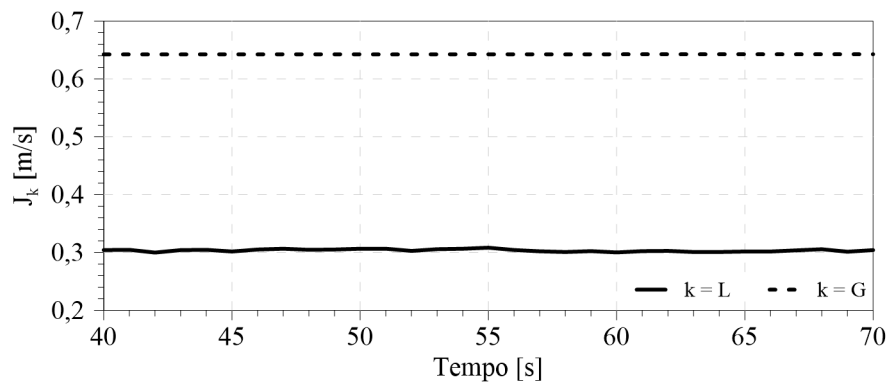


Figura 3.14: Velocidades superficiais de gás e líquido na saída da seção de testes para  $\sigma = 0,072$  e *setup C*.

### 3.7 Processamento de Dados

O processamento dos dados é realizado pelo programa Slug, desenvolvido pelo grupo de pesquisa 2PFG e reportado em Duarte (2007). O programa Slug, desde então, é passivo de alterações e suas funções vem sendo modificadas conforme necessidade experimental. A Figura 3.15 ilustra a atual interface de inicialização do programa.

O programa converte os dados de tensão em valores de pressão e tensão normalizada através das equações de calibração dos transdutores de pressão e das sondas. Após a conversão, o programa permite estimar, além da pressão, valores de fração de vazio, velocidade de translação do nariz da bolha alongada, comprimentos da bolha de gás e do pistão de líquido, frequência de passagem da golfada entre outras propriedades.

O programa conta com quatro módulos: configuração, pré-processamento, processamento principal e pós-processamento, identificados na Figura 3.15. Cada módulo possui suas respectivas funções, responsáveis por extrair a máxima informação obtida nos experimentos.

No módulo “configuração”, são inseridas as equações de calibração dos transdutores de pressão e das sondas de haste para cada estação de medição, a pressão atmosférica local no momento do experimento, densidade e viscosidade dos fluidos de trabalho, espaçamento entre as sondas de haste e distâncias entre estações de medição e o injetor gás-líquido.

O módulo de “pré-processamento” é utilizado principalmente para a visualização do sinal adquirido e escolha do fator de corte. Permite também calcular as funções

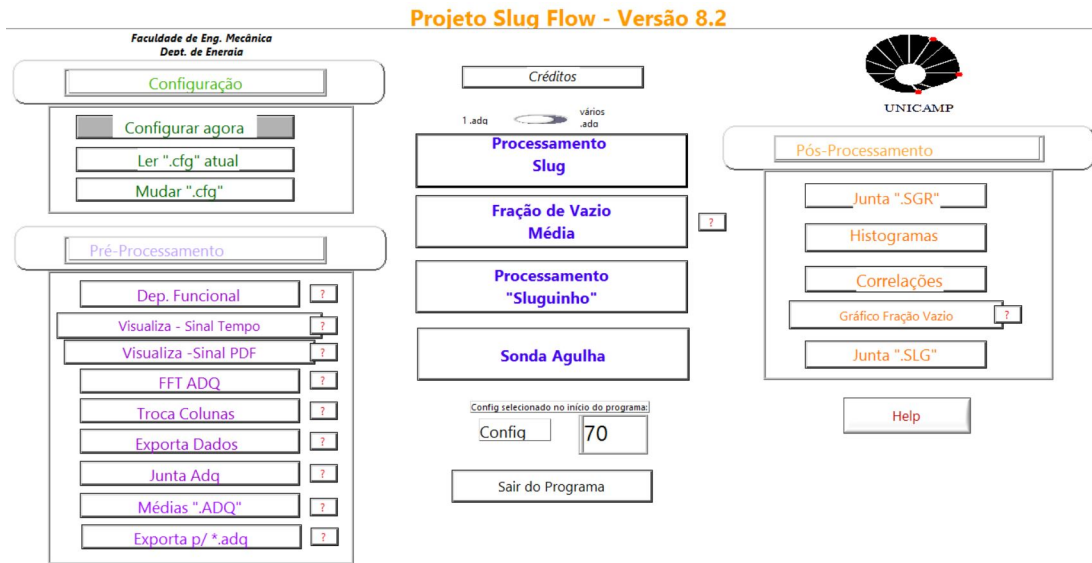


Figura 3.15: Interface gráfica do programa Slug.

densidade de probabilidade (PDF) da pressão e fração de vazio instantâneas provenientes dos experimentos.

Para o processamento dos dados, faz-se necessário a escolha do fator de corte (FC), que é um valor de tensão normalizada  $V^*$ , responsável por gerar uma onda quadrada, empregada na identificação das estruturas do escoamento. Valores de  $V^*$  superiores ao FC indicam a ocorrência de pistão de líquido e valores inferiores indicam a ocorrência de bolha de gás. O FC foi determinado de forma objetiva, procurando uma faixa de valores na qual o número de bolhas permanece constante para diferentes fatores de corte.

A normalização  $V^*$  é definida na Equação 3.1:

$$V^* = \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}, \quad (3.1)$$

onde  $V^*$  é o sinal adimensional e normalizado entre 0 e 1,  $V$  é a tensão entre 1 e 5 volts medida instantaneamente pela sonda,  $V_{min}$  é a tensão medida pela sonda na ocorrência total de gás e  $V_{max}$  é a tensão medida pela sonda na ocorrência total de líquido. O critério para discriminação de gás e líquido é apresentado abaixo:

- Se  $V^* \geq FC$  então  $V^* = 1 \rightarrow$  ocorrência de líquido;
- Se  $V^* < FC$  então  $V^* = 0 \rightarrow$  ocorrência de gás.

onde FC é o fator de corte, variando entre 0 e 1.

Geralmente para escoamento em tubos retos e sem obstrução o fator de corte utilizado está entre 0,5 e 0,6, uma vez que o escoamento flui sem intervenções externas. Neste trabalho, por se tratar de escoamento através de uma obstrução, as estruturas do escoamento sofrem significantes alterações, impedindo a escolha de um único fator de corte

para determinação de bolha de gás ou pistão de líquido. Todas as quatro estações em cada arquivo .adq foram analisadas para uma melhor determinação do fator de corte.

Na Figura 3.16, são apresentados dois gráficos da dependência funcional entre o fator de corte e o número de bolhas aceitas. Ambos os gráficos correspondem à sonda de haste localizada à montante na estação de medição E2. Na Figura 3.16a temos o escoamento sem a presença da placa de orifício, o que permite a escolha de um fator de corte entre 0,4 e 0,8 sem muita interferência no número de bolhas. Na Figura 3.16b é possível perceber que as alterações nas estruturas do escoamento ocasionadas pela placa de orifício dificultam a escolha assertiva do fator de corte. A faixa escolhida para escoamentos com a presença da obstrução foram entre 0,6 e 0,8.

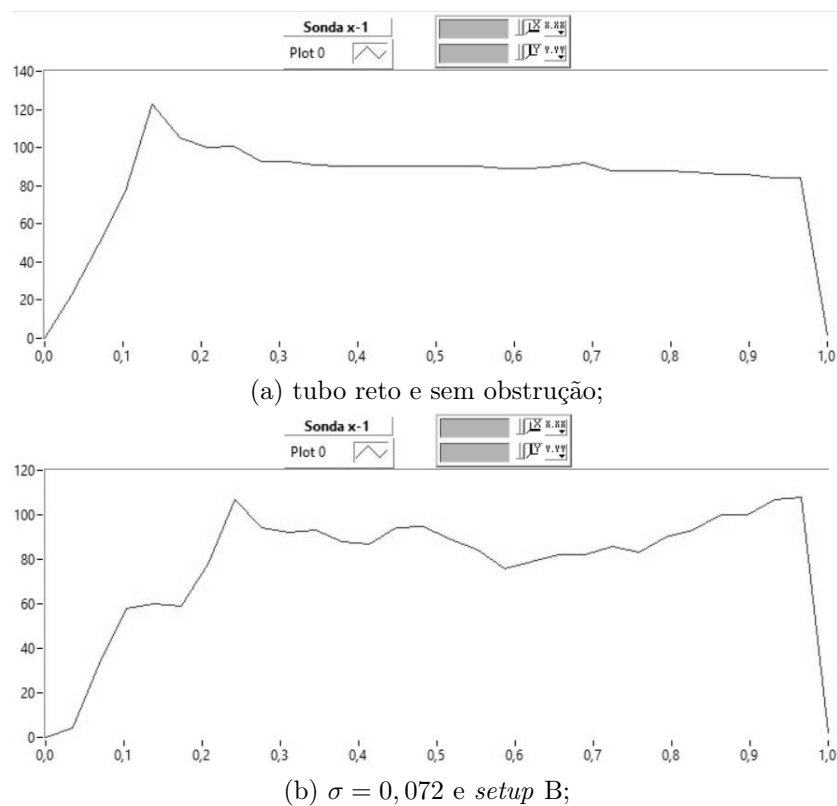


Figura 3.16: Gráficos de dependência funcional entre fator de corte e número de bolhas.

Na Figura 3.17 são apresentados dois gráficos da tensão normalizada (linha azul) e da onda quadrada (linha vermelha) gerada pela aplicação do fator de corte, ambos em função do tempo. Os dois gráficos são originados pela sonda de haste à jusante na estação de medição E3. Na Figura 3.17a o escoamento sem obstrução é apresentado, com fator de corte de 0,6. Percebe-se um perfil de escoamento típico, com periodicidade definida.

A Figura 3.17b expõe o sinal de tensão normalizada em função do tempo para razão de contração de área de 0,072, *setup* B e fator de corte de 0,8. Ficam visíveis as alterações nas estruturas do escoamento ocasionadas pela presença da placa de orifício, com a ocorrência de bolhas de diferentes tamanhos e filmes de líquido com diferentes

espessuras, bem como a presença de ar no pistão de líquido. Ao aplicar o fator de corte na Figura 3.17b, bolhas grandes e pequenas são aceitas no processamento.

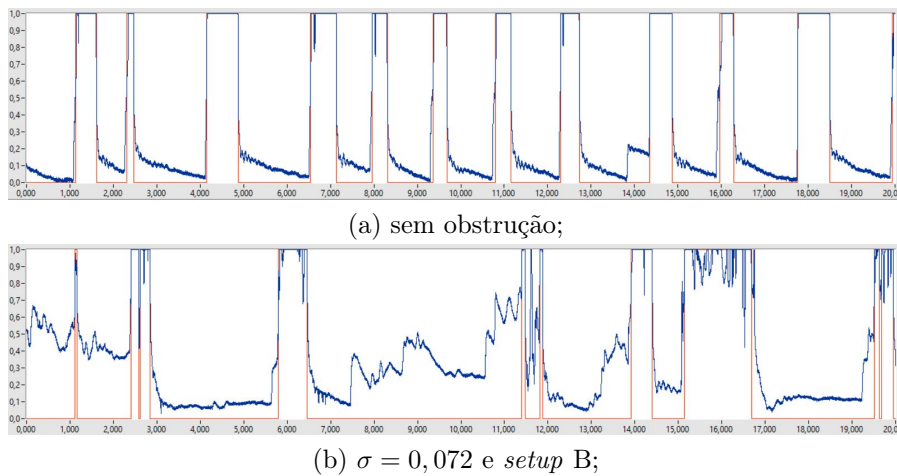
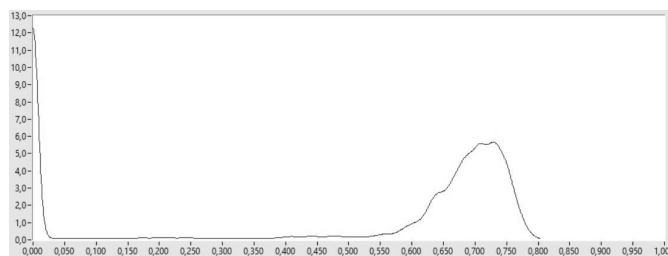
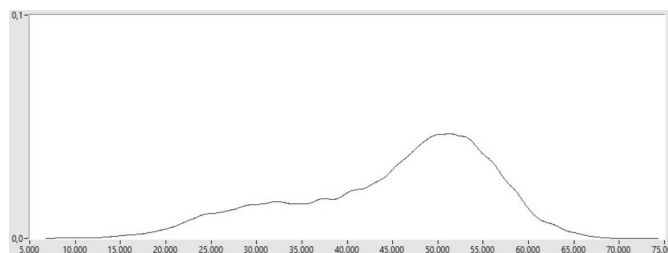


Figura 3.17: Sinais de tensão normalizada em função do tempo das sondas de haste e ondas quadradas provenientes do fator de corte.



(a) PDF de fração de vazio para escoamento sem obstrução, estação de medição 3 e sonda de haste à jusante;



(b) PDF do diferencial de pressão na placa de orifício,  $\sigma = 0,072$  e *setup* B, unidades em kPa;

Figura 3.18: Opções de PDFs instantâneos extraídos diretamente do arquivo .adq.

Ainda no módulo de "pré-processamento", é possível extrair as funções densidade de probabilidade dos transdutores de pressão e das sondas de haste. Como citado anteriormente, são medidas instantâneas e quatro PDFs são possíveis: tensão, tensão normalizada, fração de vazio e pressão. Todas as PDFs apresentadas no presente trabalho possuem área unitária abaixo da curva.

A Figura 3.18 ilustra duas opções de PDFs instantâneos extraídos diretamente do arquivo .adq. Na Figura 3.18a é apresentada a função densidade de probabilidade da fração de vazio para escoamento sem obstrução, na estação de medição E3 e sonda de haste à jusante. A Figura 3.18b expõe a função densidade de probabilidade da diferença de pressão proveniente do transdutor de pressão instalado na placa de orifício,  $\sigma = 0,072$  e *setup* B, com unidades em kPa.

O módulo “processamento principal” tem como principal função realizar um tratamento dos dados adquiridos pelo programa *Acquire*. Os sinais de tensão obtidos pelas sondas entre 1 e 5 V são normalizados entre 0 e 1 através da Equação 3.1. Os fatores de corte definidos para as sondas de haste no pré-processamento são então utilizados para realizar o corte no sinal e gerar a onda quadrada, a qual será utilizada para determinação da velocidade de translação do nariz da bolha, comprimentos e outras propriedades do escoamento.

A Figura 3.19 representa esquematicamente as ondas quadradas dos sinais do par de sondas de haste em uma determinada estação de medição. O sinal superior refere-se à sonda à montante e o inferior à sonda à jusante. No sinal superior estão representadas duas células unitárias, também chamadas de conjunto pistão-bolha (cpb) ou unidades, compostas por uma bolha de gás e um pistão de líquido, onde o cpb inicia na frente do pistão de líquido e termina na cauda da bolha de gás.

A nomenclatura  $ts_{i,j}$  é o tempo de contato do pistão de líquido com a sonda de haste, sendo o subscrito  $i = 1$  a sonda de haste à montante ou  $2$  a sonda de haste à jusante. O subscrito  $j$  identifica a unidade, sendo que  $1 \leq j \leq m$  e  $m$  é o número total de unidades em determinado experimento. O mesmo critério é utilizado para o tempo de residência da bolha em contato com a haste metálica e a variável utilizada é  $tb_{i,j}$ .  $TS_{i,j}$  é o intervalo de tempo entre o início da aquisição e o surgimento do pistão de líquido da unidade  $j$  na sonda  $i$ , o mesmo serve para a bolha de gás porém com a nomenclatura  $TB_{i,j}$ .

O tempo gasto pela  $j$ -ésima bolha para percorrer a distância entre as duas sondas de haste de uma determinada estação de medição é expresso pela Equação 3.2:

$$\Delta TB_j = TB_{i+1,j} - TB_{i,j}. \quad (3.2)$$

A velocidade de translação do nariz da  $j$ -ésima bolha,  $u_{Tj}$ , é determinada pela razão entre o espaçamento fixo de 0,1125 m,  $S_p$ , entre as sondas de haste montante e jusante de uma mesma estação de medição e o tempo gasto pela  $j$ -ésima bolha para mover-se da sonda à montante até a sonda à jusante, expresso na Equação 3.3:

$$u_{Tj} = \frac{S_p}{\Delta TB_j}. \quad (3.3)$$

A frequência de passagem da  $j$ -ésima unidade é determinada pelo inverso do período

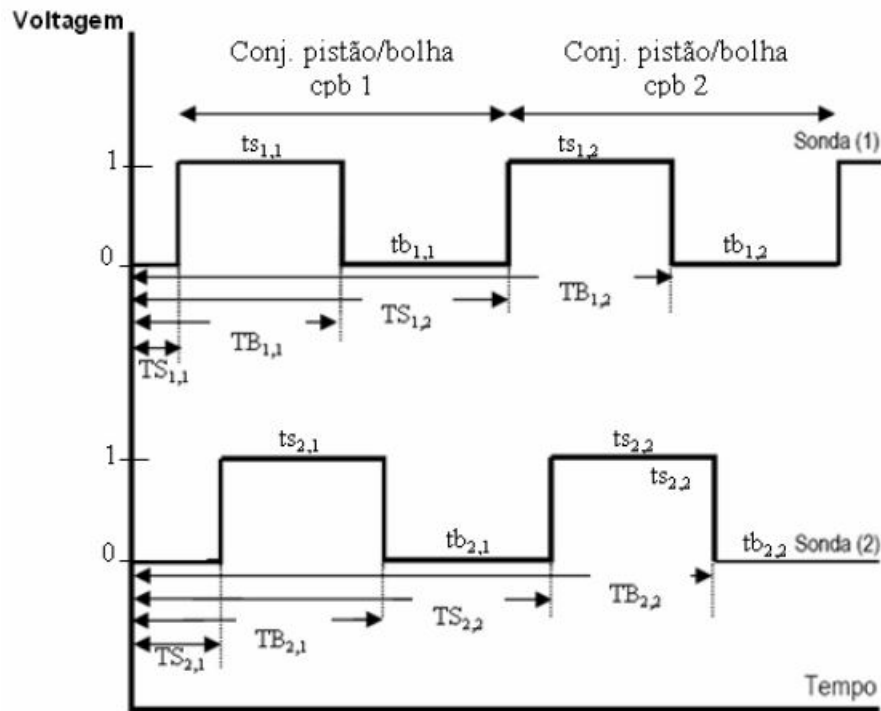


Figura 3.19: Sinais lógicos do par de sondas de haste de determinada estação de medição. Fonte: Duarte (2007)

na qual a respectiva unidade permaneceu em contato com a haste metálica conforme Equação 3.4:

$$f_j = \frac{1}{ts_{i,j} + tb_{i,j}}. \quad (3.4)$$

Os comprimentos da  $j$ -ésima bolha alongada,  $L_{fj}$ , e do  $j$ -ésimo pistão de líquido,  $L_{Sj}$  são determinados pelas razões expressas na Equação 3.5:

$$L_{fj} = \frac{u_{Tj}}{tb_{i,j}}, \quad L_{Sj} = \frac{u_{Tj}}{ts_{i,j}}, \quad (3.5)$$

onde, por hipótese,  $u_{Tj}$  se mantém constante durante os intervalos de tempo  $tb_{i,j}$  e  $ts_{i,j}$ . Esta simplificação representa fisicamente um escoamento sem obstrução fluindo em um tubo reto. Para um escoamento no regime intermitente através de uma placa de orifício,  $u_{Tj}$  não se mantém constante durante o período de tempo  $tb_{i,j}$  ou  $ts_{i,j}$ . Os comprimentos médios, neste caso, deveriam ser expressos pelas Equações representadas em 3.6:

$$\overline{L_{fj}} = \frac{1}{tb_{i,j}} \int u_{Tj} dt, \quad \overline{L_{Sj}} = \frac{1}{ts_{i,j}} \int u_{Tj} dt, \quad (3.6)$$

mas  $u_{Tj}(t)$  não é conhecido experimentalmente, portanto não será realizado medidas referente ao comprimento dos conjuntos pistão-bolha.

Considerando a bolha alongada com uma interface gás-líquido plana, a fração de vazio pode ser estimada medindo a altura de filme de líquido no centro da tubulação. Transforma-se, portanto, altura de filme em fração de vazio através da correlação geométrica de Taitel e Barnea (1990) exposta na Equação 3.7:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{\pi} \left\{ \pi - \arccos \left[ 2 \frac{h_f}{D} - 1 \right] + \left[ 2 \frac{h_f}{D} - 1 \right] \sqrt{1 - \left[ 2 \frac{h_f}{D} - 1 \right]^2} \right\}, \quad (3.7)$$

onde  $D$  é o diâmetro interno da tubulação e  $h_f$  é a altura de filme de líquido instantânea na seção de testes. Através da curva de calibração da sonda de haste, é possível encontrar a dependência de  $h_f/D$  como função de  $V^*$ . Neste trabalho, a Equação 3.7 é utilizada para calcular a evolução temporal instantânea da fração de vazio bem como a função densidade de probabilidade ilustrada na Figura 3.18a.

O escorregamento pode ser definido pela Equação 3.8:

$$S = \frac{J_G(1 - \alpha)}{J_L\alpha} = \frac{\dot{m}_G\rho_L(1 - \alpha)}{\dot{m}_L\rho_G\alpha}, \quad (3.8)$$

novamente, o cálculo com propriedades médias é corretamente aplicado para escoamentos sem a presença de obstrução.

Para um escoamento em regime intermitente na presença de uma obstrução, as velocidades superficiais e a fração de vazio sofrem alterações instantâneas dentro da seção de testes. Com a Equação 3.7, é possível obter o valor instantâneo de  $\alpha$  para cada estação de medição ao longo de todo experimento, uma vez que permite-se transformar a tensão da sonda de haste em altura de filme e fração de vazio à uma frequência de 3 kHz.

A passagem do escoamento intermitente através da obstrução gera pulsos de pressão que se propagam ao longo da seção de testes. Durante a passagem do pistão de líquido pela placa de orifício, a pressão aumenta na tubulação à montante da obstrução, acumulando massa à montante e diminuindo a transferência de massa através da placa de orifício.

Para a passagem da bolha de gás o oposto ocorre, fazendo com que o escoamento seja acelerado e a transferência de massa pela placa de orifício seja significativa. Tais efeitos são responsáveis por alterar localmente a densidade do gás e as velocidades das

fases, impedindo assim que o escorregamento seja estimado.

Portanto, as propriedades que serão analisadas neste trabalho são: velocidade de translação do nariz da bolha, frequência de passagem de golfadas, altura de filme de líquido, fração de vazio e pressão.



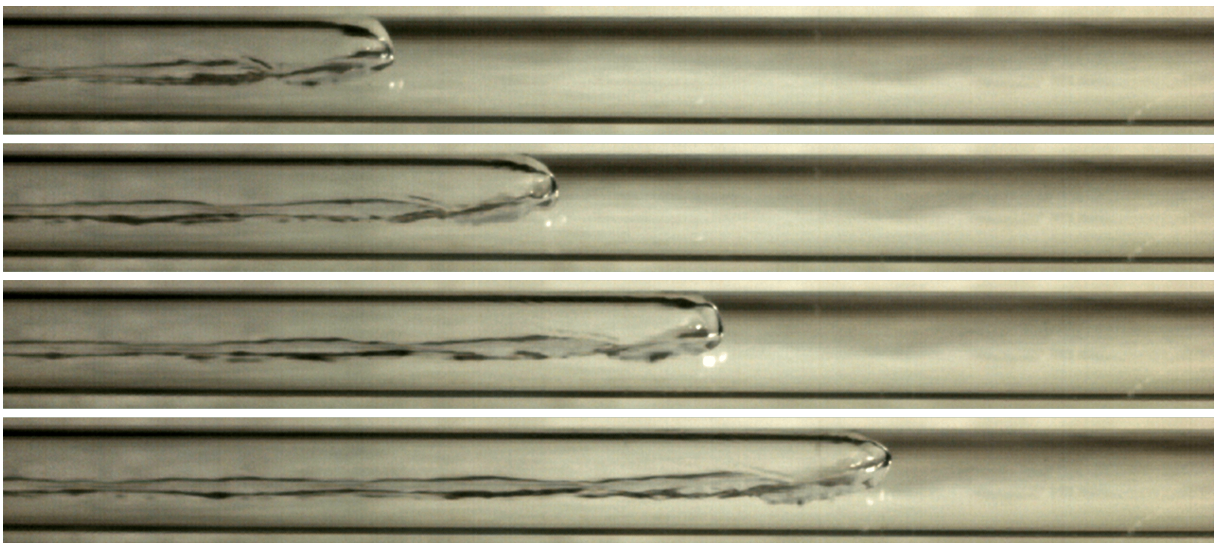
## 4. ANÁLISE DAS IMAGENS DO ESCOAMENTO

As imagens fotográficas são utilizadas para análise qualitativa dos efeitos da placa de orifício no escoamento. A discussão dos fenômenos encontrados nas imagens auxiliam na interpretação dos resultados experimentais. A filmagem foi realizada no *setup* B em três diferentes posições: 131 D à montante da placa de orifício, na placa de orifício e 38 D à jusante da placa de orifício, correspondendo, respectivamente, à 501 D, 632 D e 670 D à jusante do injetor gás-líquido.

As imagens foram amostradas à uma frequência de 200 Hz, permitindo obter detalhes das estruturas do escoamento. O sentido do escoamento é da esquerda para a direita em todas as fotos que serão apresentadas nesta Seção. As imagens ilustram os deslocamentos progressivos e retrógrados na bolha de gás e no pistão de líquido, aceleração e desaceleração do escoamento, ruptura das bolhas de gás, regime de jato na placa de orifício e o efeito de recirculação dos fluidos.

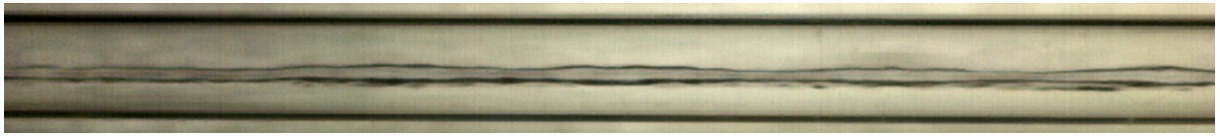
### 4.1 Imagens à 131 D à Montante do Orifício

Para referência, imagens para escoamento em tubo livre são apresentadas na Figura 4.1, que mostra o nariz, o corpo e a cauda de uma mesma bolha. Na Figura 4.1 percebe-se um pistão de líquido seguido pelo nariz de uma bolha alongada. As baixas velocidades das fases permitem que toda a fase gasosa seja transportada pela bolha de gás, dando origem à pistões de líquido não aerados. Como referência de deslocamento do nariz da bolha alongada para escoamento em tubo livre, ainda na Figura 4.1, apresenta-se uma sequência de 4 frames, com um intervalo de 0,05 segundos ou 10 frames entre fotos.

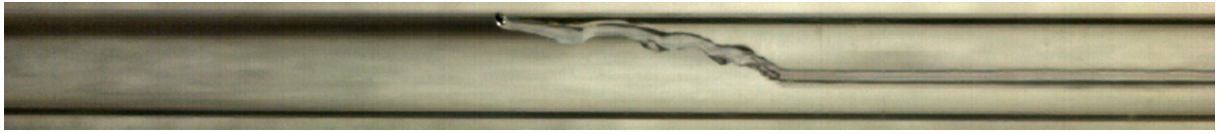


(a) Nariz da bolha alongada (intervalo de 0,05 segundos ou 10 frames entre fotos);

Figura 4.1: Escoamento em tubo livre. Ponto de filmagem: 501 D à jusante do injetor gás-líquido.



(b) Filme de líquido da bolha alongada;



(c) Cauda da bolha alongada.

Figura 4.1: escoamento em tubo livre. Ponto de filmagem: 501 D à jusante do injetor gás-líquido. (continuação)

A Figura 4.1b expõe o corpo da bolha, sendo possível notar uma interface praticamente plana com pequenas ondulações no filme de líquido. Na Figura 4.1c, nota-se a cauda da bolha com formato típico para escoamento intermitente seguida de um novo pistão de líquido, também sem a presença de ar.

Uma onda de pressão em sentido contrário ao escoamento é gerada quando o pistão de líquido atinge a placa de orifício. A respectiva onda se propaga na tubulação à montante da obstrução. Filmagens prévias identificaram que a reflexão do pulso de pressão altera o formato da bolha de gás, gerando perturbações no filme de líquido e também ocasionando o retrocesso das estruturas.

Inicia-se a análise dos efeitos da placa de orifício no escoamento intermitente pela Figura 4.2. Trata-se do deslocamento retrógrado na bolha de gás para  $\sigma = 0,072$  e *setup* B. As fotos estão separadas em um intervalo fixo 0,05 segundos entre fotos (10 frames). A filmagem localiza-se 131 D à montante da placa de orifício. O nariz da bolha de gás é identificado pela linha tracejada preta e a bolha pequena identificada pela linha tracejada branca.

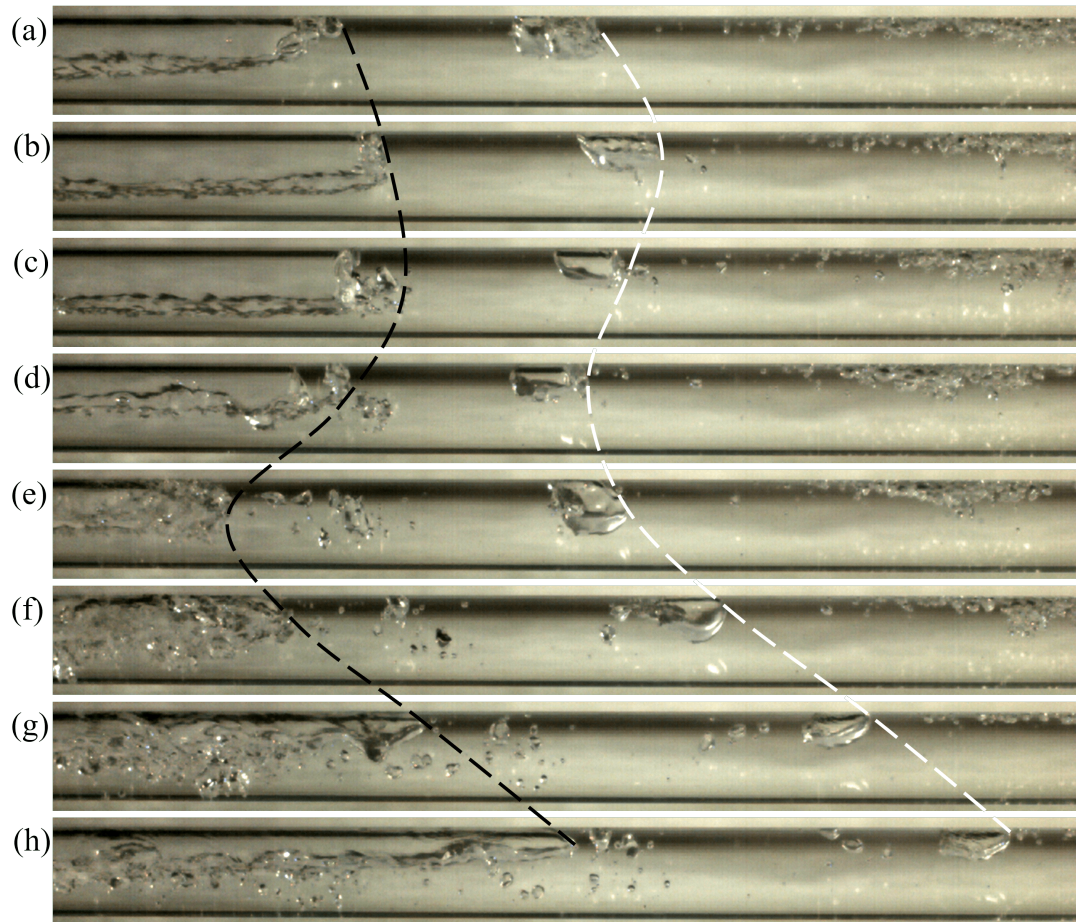


Figura 4.2: Deslocamento retrógrado do nariz da bolha alongada - *Setup B* e  $\sigma = 0,072$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.

Na letra (a) da Figura 4.2, o nariz da bolha é facilmente identificado, seguido de um filme de líquido regular. No momento em que o pistão de líquido atinge a placa de orifício, a onda de pressão refletida deforma o nariz da bolha na letra (b). Na letra (c) o escoamento inicia o retrocesso que se estende até a letra (e), levando à uma completa deformação do nariz da bolha e gerando perturbações no filme de líquido. Na letra (f), o escoamento retoma o sentido original, porém a bolha possui uma nova forma e uma maior altura de líquido quando comparada a letra (a), gerado pelo aumento da pressão à montante da obstrução e da desaceleração do escoamento. A onda de pressão possui uma rápida propagação, porém o conjunto bolha-pistão se comporta como um sistema massa-mola-amortecedor, fazendo com que mesmo após a passagem da onda de pressão, as estruturas ainda sofram modificações, até que sejam dissipadas pelo atrito.

O deslocamento retrógrado ocorre nas grandes e pequenas estruturas presentes no escoamento bifásico. Ainda na Figura 4.2, a bolha menor, identificada pela linha tracejada branca, também foi submetida ao pulso de pressão e praticamente acompanha o deslocamento da bolha maior, com exceção da letra (e), onde a bolha menor já retomou o sentido principal do escoamento e a bolha maior ainda está retrocedendo. Considerando os

diferentes comprimentos entre as bolhas analisadas, este é um comportamento esperado, uma vez que a bolha maior é facilmente deformada quando comparada à bolha menor. O escoamento segue o sentido principal porém desacelerado até a completa passagem do pistão de líquido. Percebe-se a diferença na altura de filme entre a letra (a) e letra (h).

O deslocamento retrógrado também afeta o pistão de líquido. A Figura 4.3 apresenta um pistão de líquido com a presença de bolhas de ar. A configuração apresentada é:  $\sigma = 0,072$ , *setup* B, filmagem à 131 D à montante da placa de orifício e intervalo de 0,05 segundos entre fotos (10 frames). Para análise do fenômeno um conjunto de bolhas foi selecionado e a linha tracejada preta indica a mudança em seu deslocamento.

Da letra (a) até a letra (c) da Figura 4.3, as bolhas dispersas e o pistão de líquido seguem o sentido normal do escoamento. Na letra (d), a onda de pressão refletida encontra o pistão de líquido fazendo com que as bolhas dispersas e o líquido sofram um deslocamento retrógrado. O máximo retrocesso capturado neste intervalo de tempo encontra-se na letra (f), onde as bolhas se agrupam. Conforme os efeitos são dissipados, as pequenas bolhas se separam e retomam o sentido do escoamento.



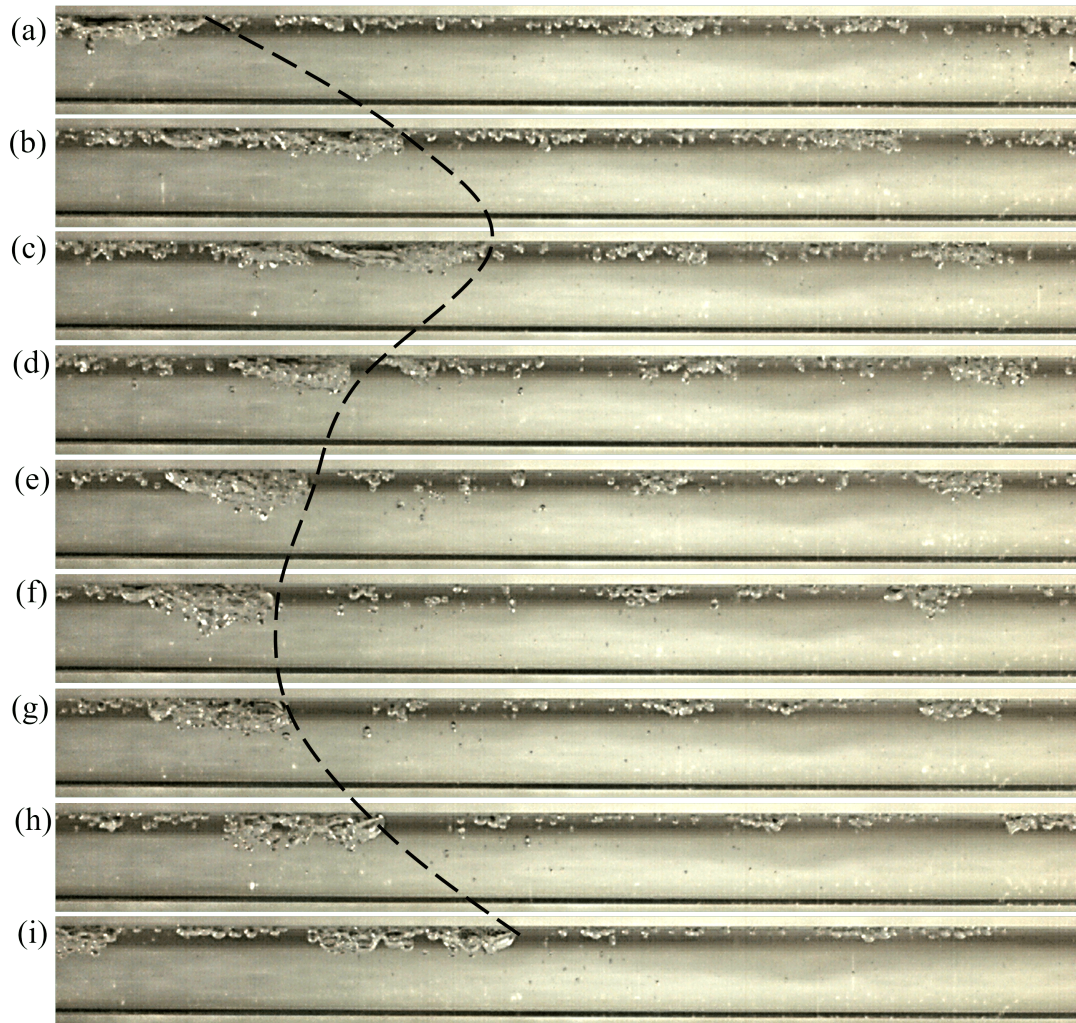


Figura 4.3: Deslocamento retrógrado do pistão de líquido - *Setup B* e  $\sigma = 0,072$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.

O deslocamento retrógrado do nariz da bolha alongada para  $\sigma = 0,123$  e *setup B* é apresentado na Figura 4.4. A filmagem foi realizada à 131 D à montante da placa de orifício e o intervalo entre as fotos é de 10 frames, resultando em um período de tempo de 0,05 segundos entre imagens. A trajetória do nariz da bolha é representada pela linha tracejada preta.

Analisando a Figura 4.4, nas letras letra (a) e (b), nota-se a presença de um pistão de líquido não aerado e do nariz de uma bolha alongada deslizando sobre um filme de líquido. Na letra (c), um pistão de líquido à frente do campo de visão da câmera atingiu a placa de orifício, propagando a onda de pressão à montante da obstrução, afetando a forma do nariz da bolha, de modo que entre as letras (d) e (e), não há deslocamento da frente da bolha. Nas letras (f) e (g) a bolha de gás retoma o sentido original do escoamento, porém com o nariz da bolha de forma alterada. Somente na letra (h) que o nariz inicia a recuperação de sua forma anterior.

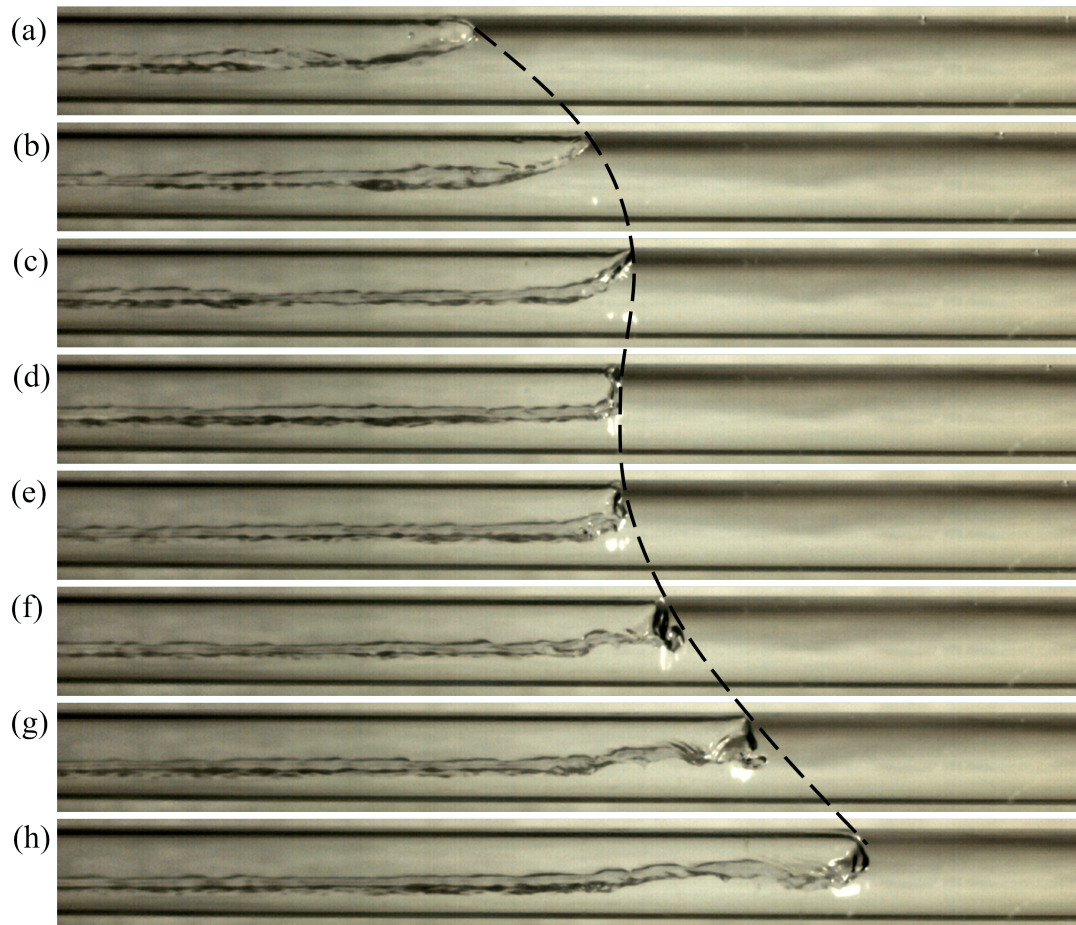


Figura 4.4: Deslocamento retrógrado do nariz da bolha alongada - *Setup B* e  $\sigma = 0,123$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.

Uma perturbação no filme de líquido é criada no momento que a bolha de gás recebe o pulso de pressão. Entre as letras (e) e (f) da Figura 4.4, a perturbação é gerada no nariz da bolha alongada e propagada em sentido à cauda da bolha, modificando a altura de filme de líquido. Nota-se na letra (h), que a perturbação no filme de líquido está mais distante do nariz da bolha quando comparado à letra (f). Essas perturbações alteram a fração de vazio local na unidade.

Alterações nos comprimentos dos pistões de líquido e bolhas, presença de pistões aerados, filmes de líquido irregulares e quebra de bolhas estão entre os fenômenos produzidos principalmente para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$ . As alterações dependem da intensidade da onda de pressão refletida da obstrução bem como o tamanho da bolha e do pistão de líquido que recebeu o pulso.

Na Figura 4.5 são apresentadas as alterações em uma pequena bolha de gás. As configurações da imagem são:  $\sigma = 0,123$ , *setup B*, intervalo de 10 frames entre foto ou 0,05 segundos com janela de filmagem localizada 131 D à montante da placa de orifício. Duas linhas são utilizadas para demarcar o nariz e a cauda da bolha alongada em análise: linha tracejada preta identifica o nariz e a linha tracejada branca identifica a cauda da



bolha.

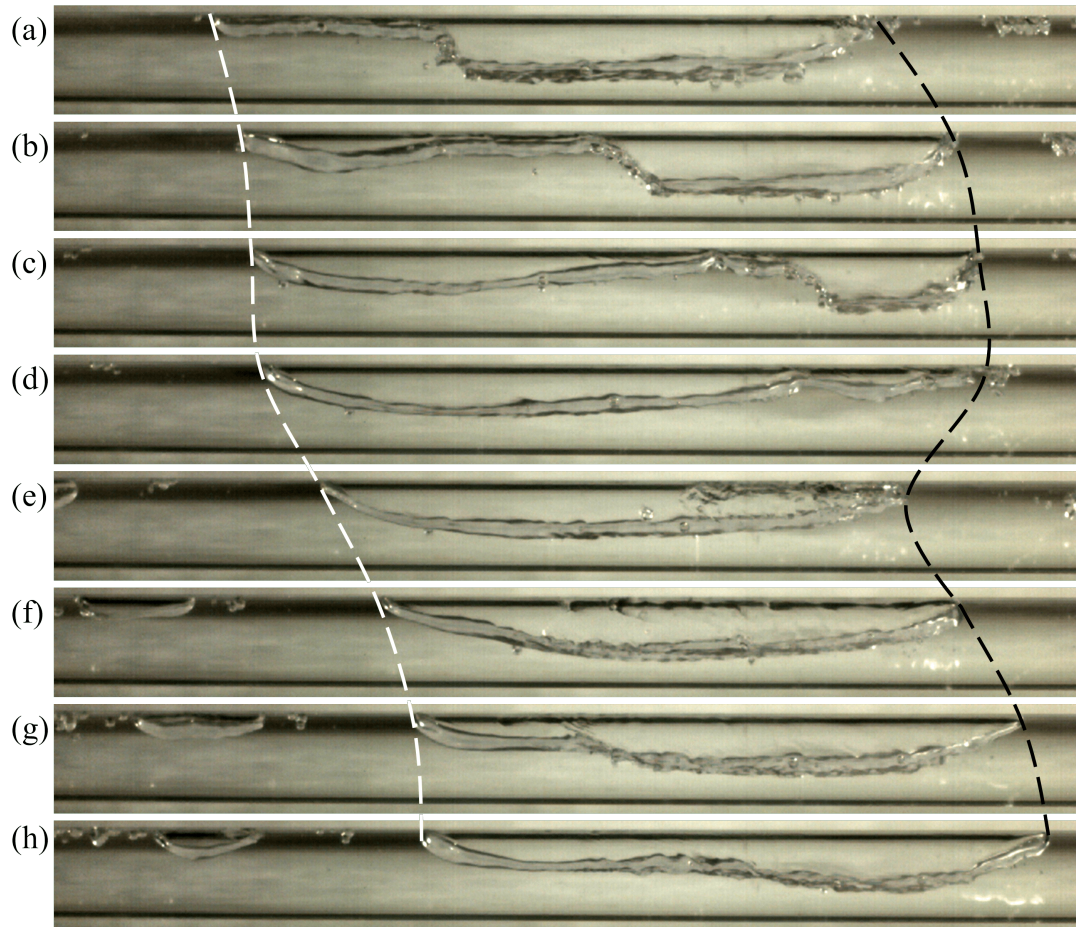


Figura 4.5: Deslocamento retrógrado em uma bolha de gás - *Setup B* e  $\sigma = 0,123$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.

A bolha da presente análise recebeu no mesmo instante uma onda de pressão refletida pela placa de orifício. Na letra (a), percebe-se duas alturas de filmes distintas presentes na bolha. Na traseira nota-se uma altura de filme de líquido maior que no corpo e nariz da bolha. À medida que a análise evolui para a letra (b), é possível notar que o filme de líquido espesso na traseira está se propagando em direção ao nariz da bolha, percebendo então que trata-se de uma perturbação proveniente de uma oscilação da cauda da bolha.

A perturbação, neste caso, se propaga em sentido contrário da Figura 4.4, onde a perturbação transladou do nariz da bolha em direção a cauda. A oscilação se propaga nas letras (c) e (d). Na letra (e) ela atinge o nariz da bolha para então atingir o pistão de líquido e ser dissipada. Conforme a oscilação no filme de líquido se propaga em direção ao nariz da bolha, o ar é transferido para a traseira. Apesar das pequenas variações na pressão interna da bolha devido à compressibilidade do gás, a massa de ar é conservada e mantida constante.

Com relação ao comprimento da bolha alongada, é possível comparar as letras (d) e

(e), onde em um intervalo de apenas 10 frames (0,05 segundos), o nariz da bolha sofreu um deslocamento retrógrado, reduzindo o comprimento da bolha de gás, para então retomar o sentido original do escoamento. Ao comparar os estados inicial e final da bolha de gás, nota-se entre as letras (a) e (h) um diferente formato de bolha com diferentes níveis de filme de líquido.

O deslocamento retrógrado encontra-se também na cauda da bolha de gás, conforme exposto na Figura 4.6. Trata-se do escoamento com  $\sigma = 0,072$  para *setup* B. A filmagem foi realizada 131 D à montante da placa de orifício e as fotos expostas possuem um intervalo fixo de 10 frames (0,05 segundos) entre fotos. A linha preta tracejada descreve a trajetória da cauda da bolha em determinados instantes de tempo.

Nota-se na letra (a) uma bolha de gás com filme de líquido irregular seguida por um pistão de líquido com a presença de pequenas bolhas. Na letra (b), após ser a estrutura ser afetada pela onda de pressão refletida da obstrução, a cauda da bolha inicia o deslocamento negativo atingindo seu ponto máximo na letra (d). Na letra (e) a cauda retoma o sentido do escoamento de tal forma que este movimento gera uma perturbação no filme de líquido, visível na letra (g).

Na análise das as letras (h) e (i), percebe-se que a perturbação no filme de líquido se propaga em direção ao nariz da bolha. A propagação da ondulação no filme de líquido proveniente da cauda da bolha de gás pode, dependendo de sua amplitude, ser dissipada ao atingir o pistão de líquido à frente ou tocar a parte superior da tubulação partindo a bolha e gerando um novo pistão de líquido, da mesma forma que a perturbação proveniente do nariz da bolha, como citado anteriormente.



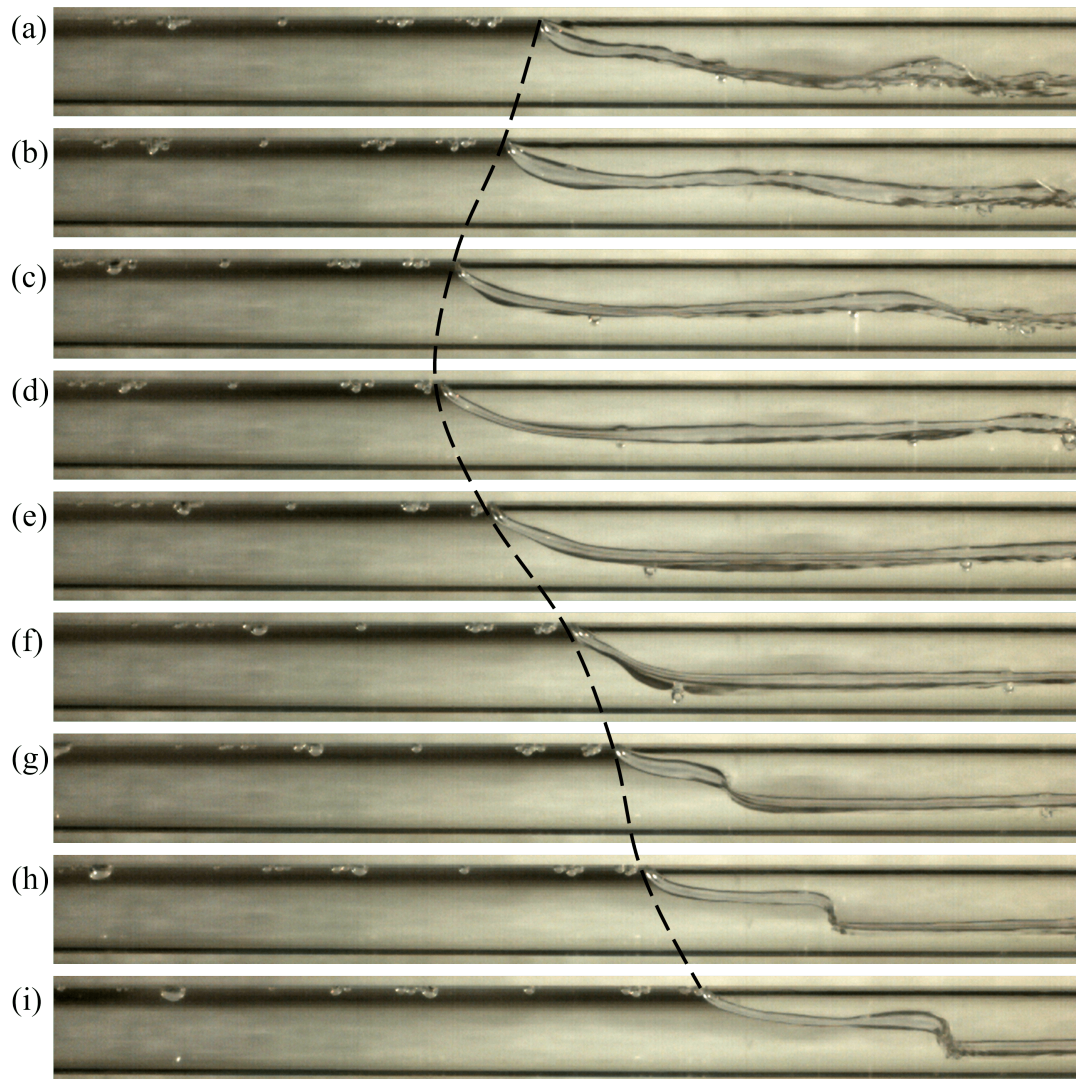


Figura 4.6: Deslocamento retrógrado da cauda da bolha alongada - *Setup B* e  $\sigma = 0,072$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.

Conforme citado no início desta Seção, um dos efeitos gerados pela intermitência do escoamento através da placa de orifício é a aceleração e desaceleração do escoamento. Quando o pistão de líquido atinge a placa de orifício, o escoamento é desacelerado. A fase líquida acumula-se à montante da obstrução ocasionando um aumento na altura de filme de líquido e uma redução na velocidade de translação do nariz da bolha. Para conservar a massa, o comprimento da bolha de gás aumenta. Quando a bolha de gás atinge o orifício, o escoamento é acelerado, o filme de líquido decresce e o comprimento da bolha de gás diminui. Os efeitos de aceleração e desaceleração atingem primeiramente as estruturas próximas à obstrução e posteriormente as estruturas mais afastadas. Uma pequena bolha foi selecionada para explicação de tal efeito.

A Figura 4.7 ilustra o efeito da desaceleração e aceleração do escoamento na espessura do filme de líquido e no comprimento da bolha de gás para  $\sigma = 0,072$  e *setup B*.

As imagens possuem um intervalo constante de 5 frames (0,025 segundos) entre fotos e o ponto de filmagem é 131 D à montante da obstrução. As linhas tracejadas preta e branca foram utilizadas para demarcar a alteração no comprimento da bolha de gás.

Nas letras (a) e (b) da Figura 4.7 é possível identificar um filme de líquido espesso e uma bolha de gás comprimida na parte superior da tubulação, ilustrando o fenômeno de desaceleração. Na letra (c), nota-se uma pequena alteração no nariz e no comprimento da bolha alongada, de forma que nas letras (d), (e) e (f), para garantir a conservação da massa, o filme de líquido reduz de espessura e a bolha diminui seu tamanho conforme é acelerada.



Figura 4.7: Efeito de desaceleração e aceleração no escoamento - *Setup B* e  $\sigma = 0,072$ , intervalo de 5 frames ou 0,025 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.

A ruptura de bolhas é um dos efeitos gerados pela passagem intermitente do escoamento através da placa de orifício. A Figura 4.8 demonstra um exemplo de ruptura de uma bolha alongada para  $\sigma = 0,072$ , *setup B*, intervalo de 0,025 segundos entre fotos ou 5 frames, com a câmera localizada 131 D à montante da obstrução.

A letra (a) da Figura 4.8, apresenta-se uma bolha de gás com um filme de líquido irregular dotado de uma pequena oscilação. A oscilação, originária da pulsação da cauda da respectiva bolha, se propaga nas letras subsequentes até que na letra (f) ocorre o toque na região superior do tubo, ocorrendo a quebra da bolha e o surgimento de um pequeno pistão de líquido. O rompimento da bolha gera duas novas bolhas com comprimentos e formatos diferentes. Esse fenômeno é responsável por gerar um espalhamento nas densidades espectrais de potência e nas funções densidade de probabilidade, que serão



apresentadas na Seção 5.2.2.

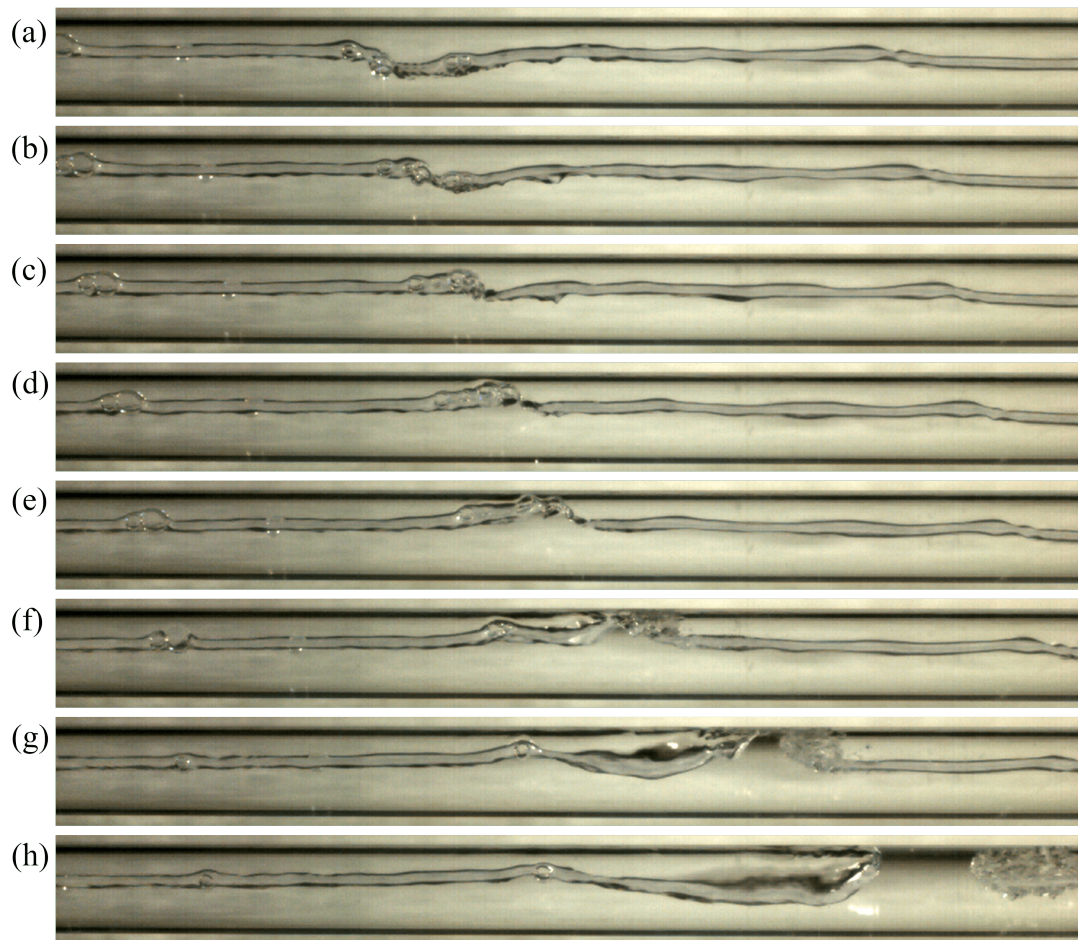


Figura 4.8: Ruptura da bolha de gás - *Setup B* e  $\sigma = 0,072$ , intervalo de 5 frames ou 0,025 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.

A Figura 4.8 apresentou a ruptura da bolha de gás para um orifício com  $\sigma = 0,072$ . É possível encontrar este fenômeno também para  $\sigma = 0,250$ . A Figura 4.9 exhibe a quebra de bolhas para  $\sigma = 0,250$  e *setup B* com filmagem localizada 131 à montante da placa de orifício com intervalo de 0,05 segundos entre fotos ou 10 frames.

Analisando a Figura 4.9, percebe-se na letra (a) uma bolha de gás com duas alturas de filme de líquido. A bolha de gás se mantém comprimida na parte superior interna da tubulação onde o filme de líquido está mais espesso. A bolha avança na letra (b) até que na letra (c) ocorre o toque do líquido na parte superior do tubo, ocorrendo o rompimento.

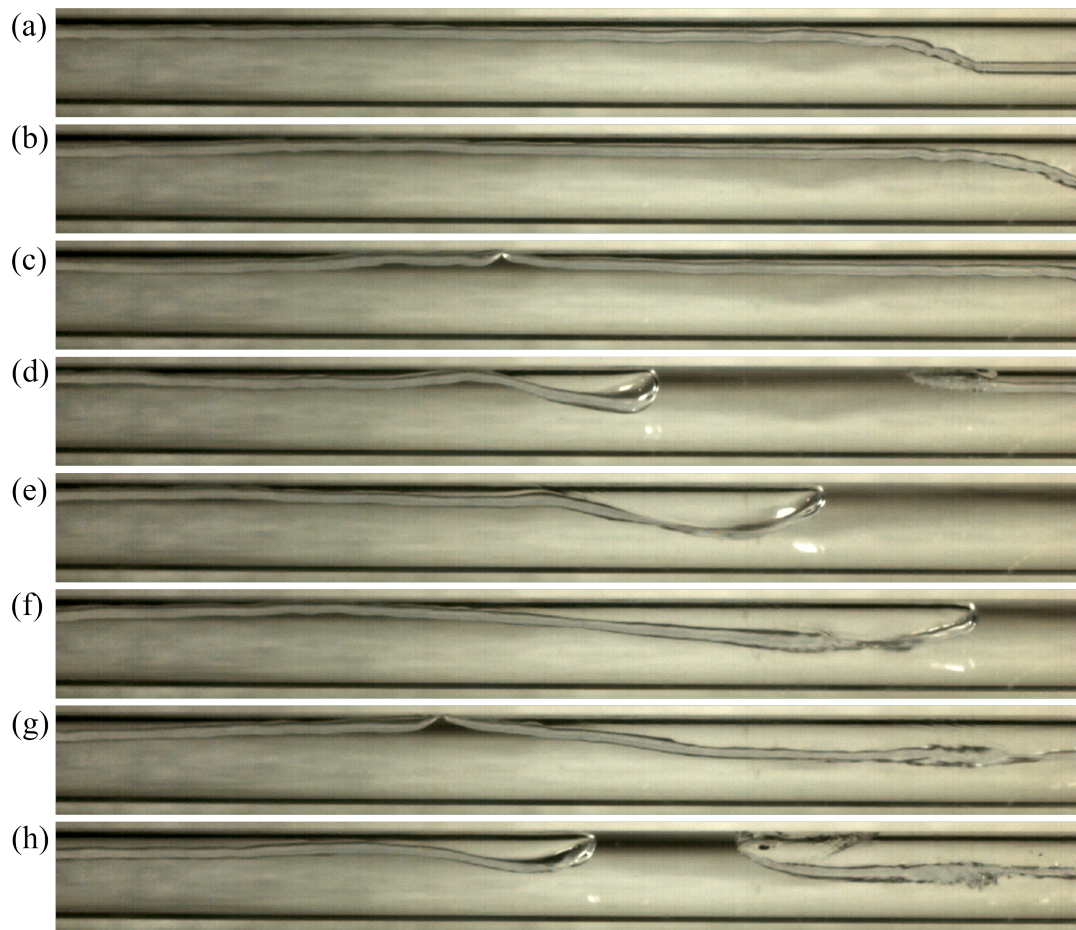


Figura 4.9: Ruptura da bolha de gás - *Setup* B e  $\sigma = 0,250$ , intervalo de 0,05 segundos entre fotos (10 frames). Ponto de filmagem: 131 D à montante da placa de orifício.

## 4.2 Imagens no Orifício e 38 D à Jusante

A câmera também foi posicionada 632 D à jusante do injetor gás-líquido, correspondendo à placa de orifício no *setup* B. O objetivo é entender os fenômenos na obstrução e sua vizinhança durante a passagem do escoamento intermitente. A Figura 4.10 revela a passagem do pistão de líquido pela placa de orifício para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 no *setup* B. A passagem do pistão de líquido através do orifício gera o regime de jato à jusante da contração.

O regime de jato ocorre devido a contração de área imposta pela placa de orifício. Considerando a incompressibilidade da água, é necessário que ocorra uma aceleração na garganta do orifício à medida que o pistão de líquido se desloca, resultando em um jato de líquido. O regime de jato está de acordo com Owen e Hussein (1994), que fazem uma analogia ao conhecido processo de extrusão. Os autores afirmam que o pistão de líquido é *extrudado* conforme passa pela placa de orifício.

A recirculação dos fluidos de teste é composta por uma mistura bifásica de água e ar e é gerada quando o jato de líquido, proveniente da placa de orifício, decai com a

ação da gravidade, atingindo a parte inferior da tubulação à jusante da obstrução. O jato é responsável por preencher a tubulação à jusante da obstrução. Conforme ocorre o preenchimento, a recirculação é deslocada em direção à placa de orifício. O fenômeno de recirculação dos fluidos de teste logo à jusante da placa de orifício está de acordo com Salcudean, Groeneveld e Leung (1983), dos quais atestaram que uma intensa mistura entre as fases ocorre logo após a obstrução.

Percebe-se na Figura 4.10a, um pistão de líquido escoando pela placa de orifício. É possível identificar o jato de líquido proveniente da obstrução. À jusante, o jato gera uma zona de recirculação, que se mantém até a passagem de uma nova bolha de gás pela obstrução.

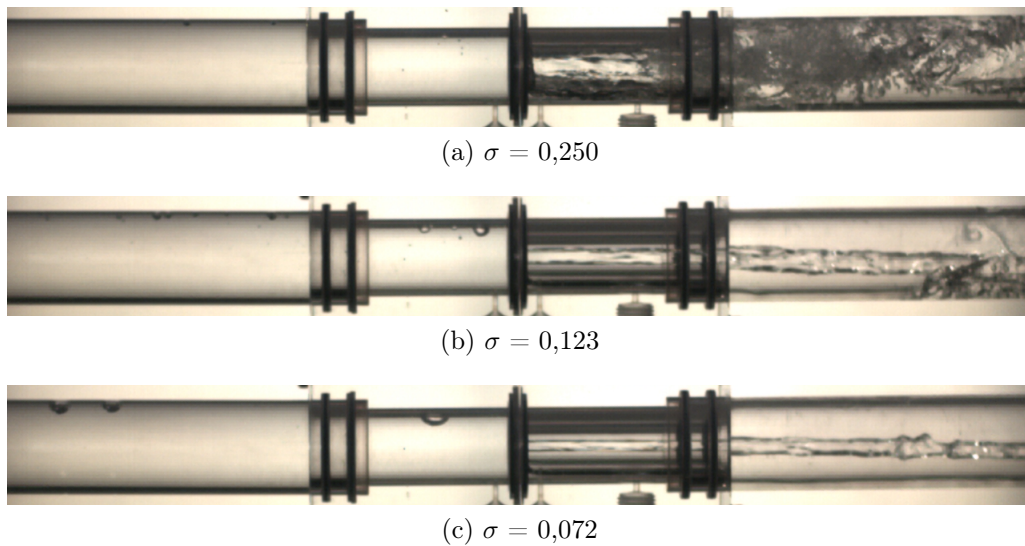


Figura 4.10: Passagem do pistão de líquido pela placa de orifício para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$ . Ponto de filmagem: placa de orifício no *setup* B.

A Figura 4.10b apresenta a passagem do pistão de líquido para  $\sigma = 0,123$ . O jato, quando comparado à Figura 4.10a, possui uma menor espessura e é lançado à uma maior distância. O toque do jato com a parte inferior da tubulação ocorre na extrema direita da imagem, fazendo com que a recirculação aconteça mais distante do orifício.

À medida que a razão de contração de área decresce, maior é a velocidade do jato de líquido. Na Figura 4.10c é utilizada a menor razão de contração de área:  $\sigma = 0,072$ . Nota-se um jato menos espesso quando comparado com as figuras anteriores. A zona de recirculação ocorre distante da obstrução.

Nota-se à montante da placa de orifício, na Figura 4.11, que o pistão de líquido ainda está finalizando sua passagem pela obstrução. Contudo, à jusante, percebe-se a inexistência do jato de líquido. A recirculação ocorre muito próximo da obstrução, de forma que o retrocesso de fluidos atinge a placa de orifício destruindo o jato de líquido. A destruição do jato pela recirculação foi encontrada somente para  $\sigma = 0,250$ . Para  $\sigma =$



0,123 e 0,072, a recirculação de fluidos ocorre distante da obstrução, mantendo a existência do jato de líquido.

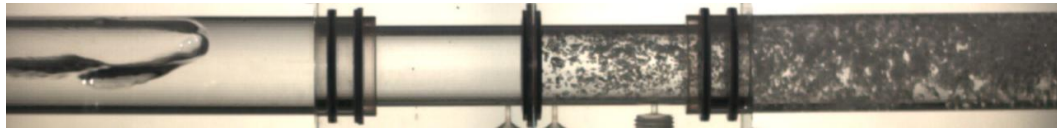


Figura 4.11: Destrução do regime de jato à jusante da obstrução devido a recirculação de fluidos - *Setup B* e  $\sigma = 0,250$ . Ponto de filmagem: placa de orifício no *setup B*.

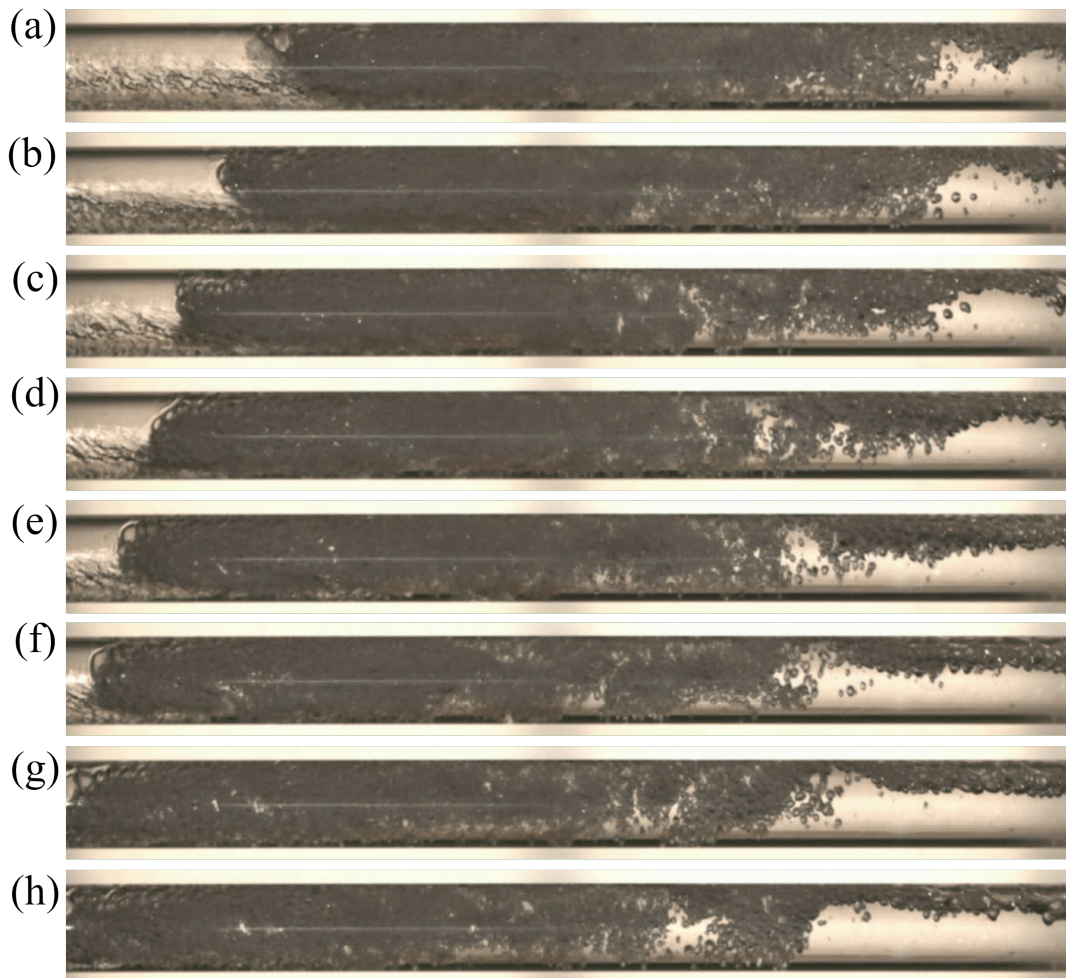


Figura 4.12: Fenômeno de recirculação à jusante da placa de orifício - *Setup B* e  $\sigma = 0,072$ , intervalo de 10 frames ou 0,05 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: 38 D à jusante da placa de orifício no *setup B*.

Para o fenômeno de recirculação de fluidos, deslocou-se a câmera 38 D à jusante da placa de orifício no *setup B*. A Figura 4.12 apresenta o fenômeno de recirculação de fluidos para  $\sigma = 0,072$  com um intervalo de 0,05 segundos entre fotos ou 10 frames.

Analisando a letra (a) da Figura 4.12, é possível dividir a imagem em três partes: a primeira é a presença de ar antes da recirculação, a segunda é a recirculação de fluidos

determinada pela mistura homogênea e a terceira é o surgimento de um pistão de líquido aerado. À medida que o pistão de líquido passa pela placa de orifício, a tubulação à jusante é preenchida pela mistura de ar e água, desenvolvendo um novo escoamento. Conforme ocorre o preenchimento, a mistura é deslocada em direção ao orifício.

Retomando a análise para a placa de orifício, é possível avaliar a aproximação da bolha de gás. Conforme o pistão de líquido finaliza sua passagem pela obstrução, a velocidade do jato de líquido proveniente do orifício diminui devido ao aumento da pressão à montante.

A Figura 4.13 mostra o final de um pistão de líquido dotado de um jato de menor intensidade, recebendo a aproximação de uma bolha de gás na placa de orifício. As configurações são:  $\sigma = 0,072$ , *setup* B, filmagem na placa de orifício e intervalo de 0,005 segundos entre fotos ou 1 frame.

Na letra (a) da Figura 4.13, percebe-se à montante da obstrução o final de um pistão de líquido seguido por uma bolha de gás. À jusante, o regime de jato muito bem definido por um jato de líquido no mesmo diâmetro do orifício. Na letra (b), a bolha de gás é succionada pela obstrução de modo que seu nariz é distorcido. Na letra (c), o gás passa pelo orifício destruindo a continuidade do jato. Nas letras subsequentes, é possível perceber que o jato se tornou bifásico e irregular.

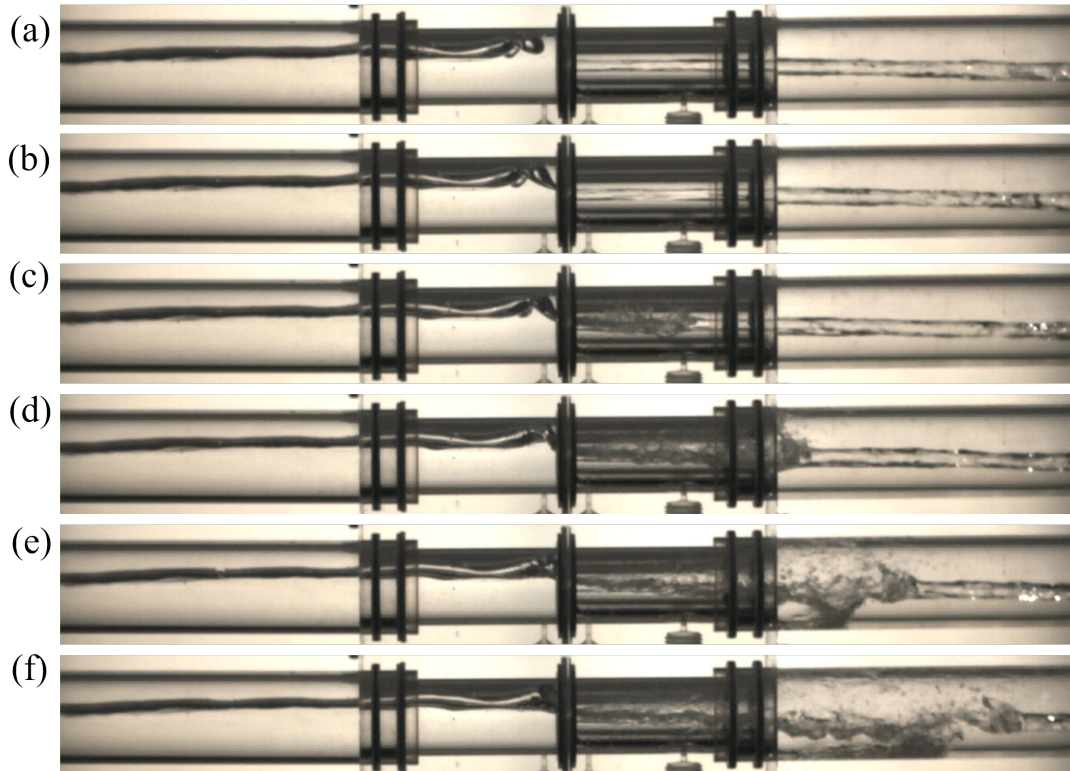


Figura 4.13: Entrada da bolha de gás na placa de orifício - *Setup* B e  $\sigma = 0,072$ , intervalo de 1 frame ou 0,005 segundos entre fotos. Ponto de filmagem: placa de orifício no *setup* B.

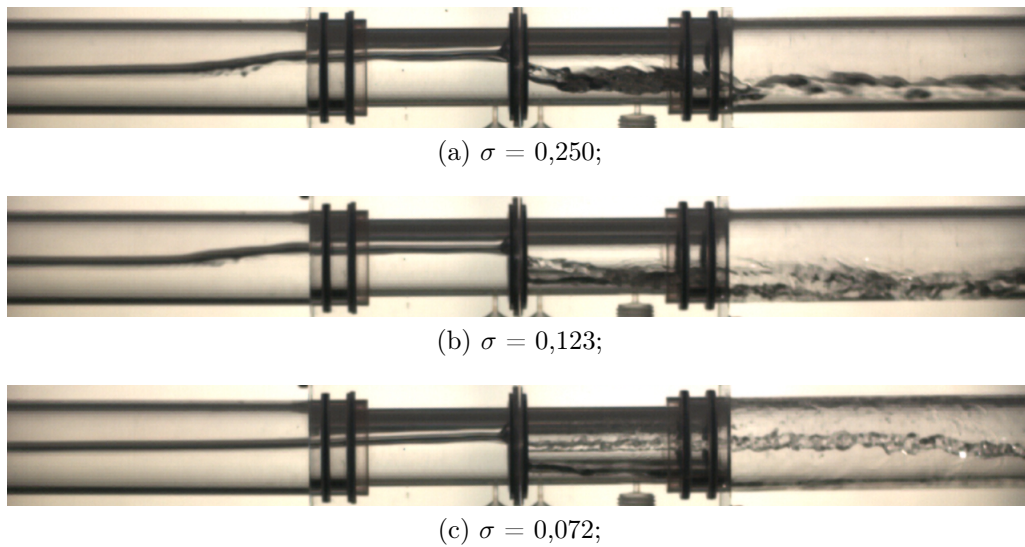


Figura 4.14: Passagem da bolha de gás pela placa de orifício para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$ . Ponto de filmagem: placa de orifício no *setup* B.

A Figura 4.14 apresenta a passagem de uma bolha de gás pela placa de orifício posicionada no *setup* B para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$ . Para  $\sigma = 0,250$ , nota-se que o filme de líquido escoou pela parte inferior do orifício enquanto que o gás fluiu pela parte superior, como um escoamento no regime estratificado. Para  $\sigma = 0,123$  percebe-se a presença de um pequeno jato bifásico. Finalmente, para  $\sigma = 0,072$  destaca-se o jato bifásico e irregular passando pela obstrução.

O choque do pistão de líquido com a placa de orifício gera uma onda de pressão que é refletida, causando o retrocesso do escoamento à montante da obstrução. Tal fenômeno é discutido nas Figuras 4.2 até 4.6. Percebe-se nas Figuras, diversas alterações no filme de líquido para escoamentos na presença da placa de orifício quando comparado ao escoamento em tubo livre (Figura 4.1).

A passagem alternada de pistões de líquido e bolhas de gás pela placa de orifício acelera e desacelera os fluidos de teste, causando modificações nas estruturas do escoamento, apresentadas na Figura 4.7. Com a desaceleração, a velocidade de translação do nariz da bolha decresce e o líquido acumula-se à montante da obstrução, gerando um aumento na altura de filme de líquido. Durante a aceleração o filme de líquido decresce e a velocidade do nariz da bolha aumenta. As perturbações geradas no filme de líquido ocasionam fenômenos de quebra de bolha, apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9. Tal fenômeno afeta os tamanhos das unidades ao longo da tubulação.

Na placa de orifício, destaca-se o jato de líquido gerado durante a passagem do pistão de líquido, Figura 4.10. Conforme a razão de contração de área decresce, maior a velocidade do jato de líquido proveniente da obstrução. Para a passagem da bolha de gás pelo orifício, Figura 4.14, destacam-se dois regimes: estratificado para  $\sigma = 0,250$  e jato bifásico para  $\sigma = 0,072$ . Após passar pela placa de orifício, o escoamento é submetido à



um novo processo de desenvolvimento onde ocorre uma intensa recirculação dos fluidos de teste, destacado na Figura 4.12.

Os vídeos dos fenômenos apresentados também estão presentes no YouTube, sendo <<https://www.youtube.com/watch?v=gF5K2fB4aPM>> à montante do orifício e <<https://www.youtube.com/watch?v=j5UKUscDbCg>> no orifício.

## 5. RESULTADOS

A Seção 5.1 descreve as condições operacionais dos testes. A discussão dos resultados experimentais estendem-se da Seção 5.2 até a Seção 5.5 e são apresentados na seguinte sequência: pressão, fração de vazio, velocidade de translação do nariz da bolha alongada e frequência de passagem de golfadas.

### 5.1 Condições Operacionais

Na Tabela 5.1 são apresentados o número de unidades e os valores médios das velocidades superficiais de líquido e de gás para cada estação de medição englobando as 10 séries apresentadas na Tabela 3.2. Os valores médios para as velocidades superficiais foram obtidos utilizando os 10 experimentos de cada série.

O único valor apresentado para a velocidade superficial média de líquido,  $\overline{J_L}$ , em todas as séries é de 0,30 m/s e se repete em todas as estações de medição devido a incompressibilidade da água. Para a velocidade superficial média de gás,  $\overline{J_G}$ , é aplicada a razão de pressão relatada na Seção 3.6, portanto, à medida que o escoamento atinge a saída da seção de testes, o ar sofre uma descompressão aumentando sua velocidade. Priorizou-se manter próximo de 0,50 m/s a velocidade superficial média de gás nas estações à montante da obstrução para todos os testes, veja Tabela 5.1.

Nota-se o salto em  $\overline{J_G}$  entre as estações E1 e E2 no setup A e estações E3 e E4 no setup B. O aumento brusco em  $\overline{J_G}$  é dado pela descompressão do escoamento após passar pela placa de orifício, uma vez que  $\overline{J_G}$  é corrigido pela razão de pressão. Tal aumento torna-se mais evidente para  $\sigma = 0,123$  e 0,072.

Para o escoamento em tubo livre nota-se que o número de unidades diminui gradativamente. A coalescência é o fenômeno responsável por essa alteração. Avaliando as estações à montante e à jusante da obstrução, percebe-se que independente do *setup*, o número de unidades é decrescente em todas as séries utilizando  $\sigma = 0,250$ , sugerindo que a respectiva razão de contração de área causa pouca perturbação no escoamento. Além disto, o número de unidades possui um comportamento próximo ao do escoamento livre.

Com  $\sigma = 0,123$ , nota-se para *setup* A que o número de unidades nas estações à jusante da obstrução (E2, E3 e E4) sofre maior alteração devido a presença da singularidade. Para o *setup* B, o número de unidades decresce até E3 (montante à obstrução) e aumenta na E4 (jusante à obstrução). Para *setup* C, todas as estações se localizam à montante da obstrução, fazendo com que o número de unidades apresente um comportamento decrescente.

Para  $\sigma = 0,072$  e *setup* A, percebe-se que o número de células unitárias em E2, E3 e E4 são alterados após a passagem do escoamento pela obstrução. No *setup* B, O número de unidades decresce até E3 (montante da obstrução) e aumentam na E4 (jusante). Já

Tabela 5.1: Grade de testes. Velocidade superficial de líquido, velocidade superficial de gás e número de unidades para cada série.

	Estação	$\overline{J}_L$ m/s			$\overline{J}_G$ m/s			Unidades -		
Tubo Livre	E1	0,30			0,50			939		
	E2	0,30			0,51			789		
	E3	0,30			0,51			649		
	E4	0,30			0,52			618		
Razão de Contração de Área	Estação	Setup A			Setup B			Setup C		
		$\overline{J}_L$ m/s	$\overline{J}_G$ m/s	Unid. -	$\overline{J}_L$ m/s	$\overline{J}_G$ m/s	Unid. -	$\overline{J}_L$ m/s	$\overline{J}_G$ m/s	Unid. -
$\sigma = 0,250$	E1	0,30	0,50	721	0,30	0,49	595	0,30	0,49	627
	E2	0,30	0,51	692	0,30	0,49	591	0,30	0,50	582
	E3	0,30	0,52	653	0,30	0,50	508	0,30	0,50	502
	E4	0,30	0,53	635	0,30	0,51	445	0,30	0,50	492
$\sigma = 0,123$	E1	0,30	0,50	478	0,30	0,48	474	0,30	0,49	564
	E2	0,30	0,54	509	0,30	0,48	428	0,30	0,49	476
	E3	0,30	0,54	460	0,30	0,49	359	0,30	0,50	392
	E4	0,30	0,56	480	0,30	0,53	389	0,30	0,50	312
$\sigma = 0,072$	E1	0,30	0,50	322	0,30	0,49	456	0,30	0,50	585
	E2	0,30	0,62	380	0,30	0,49	401	0,30	0,50	495
	E3	0,30	0,63	390	0,30	0,51	309	0,30	0,51	362
	E4	0,30	0,63	374	0,30	0,62	355	0,30	0,51	258

para o *setup C*, repete-se o comportamento encontrado em  $\sigma = 0,250$  e  $0,123$ , decrescendo o número de unidades.

O acréscimo no número de células unitárias encontradas nas estações à jusante da obstrução para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  evidencia que o escoamento é reformulado e está sofrendo um novo desenvolvimento. Um dos fenômenos presentes no desenvolvimento de um novo escoamento à jusante da obstrução é a recirculação de fluidos, apresentado na Seção 4.

A Equação 5.1 apresenta o número de Reynolds médio da mistura,  $\overline{Re}$ , e o número de Froude médio da mistura,  $\overline{Fr}$ , como função da velocidade superficial média da mistura,  $\overline{J}$ , definida pela soma  $\overline{J}_L + \overline{J}_G$ :

$$\overline{Re} = \frac{\rho_L \overline{J} D}{\mu_L}, \quad \overline{Fr} = \frac{\overline{J}}{\sqrt{gD}}, \quad (5.1)$$

onde  $D$  é o diâmetro interno da tubulação,  $g$  a aceleração gravitacional,  $\rho_L$  e  $\mu_L$  a massa específica e a viscosidade absoluta da água, respectivamente. Como citado na Seção 3.6, os experimentos foram realizados em uma temperatura média de  $25^\circ\text{C}$  e pressão atmosférica média de  $93,7\text{ kPa}$ .

A Tabela 5.2 apresenta o número de Reynolds médio da mistura e o número de

Froude médio da mistura. O número de Reynolds médio da mistura para escoamento em tubo livre varia entre 20830 e 21179 e o número de Froude médio da mistura está entre 1,59 e 1,62.

Para escoamento com obstrução, o número de Reynolds nas estações à montante da obstrução varia entre 20322 e 21093 e o número de Froude médio da mistura está entre 1,55 e 1,61. Tanto para escoamento em tubo livre quanto na presença da placa de orifício, o regime é turbulento.

Tabela 5.2: Número de Reynolds e número de Froude em função da velocidade superficial média da mistura para cada série.

	Estação	$\overline{Re}$		$\overline{Fr}$			
		-		-			
Tubo Livre	E1	20830		1,59			
	E2	20897		1,59			
	E3	21040		1,61			
	E4	21179		1,62			
Razão de Contração de Área	Estação	<i>Setup A</i>		<i>Setup B</i>		<i>Setup C</i>	
		$\overline{Re}$	$\overline{Fr}$	$\overline{Re}$	$\overline{Fr}$	$\overline{Re}$	$\overline{Fr}$
		-	-	-	-	-	-
$\sigma = 0,250$	E1	20831	1,59	20562	1,57	20567	1,57
	E2	21143	1,61	20614	1,57	20615	1,57
	E3	21306	1,63	20758,	1,58	20764	1,58
	E4	21427	1,64	21169	1,62	20836	1,59
$\sigma = 0,123$	E1	20657	1,58	20322	1,55	20350	1,55
	E2	21800	1,66	20343	1,55	20375	1,55
	E3	21830	1,67	20555	1,57	20572	1,57
	E4	22200	1,69	21616	1,65	20605	1,57
$\sigma = 0,072$	E1	20652	1,58	20701	1,58	20590	1,57
	E2	23848	1,82	20706	1,58	20598	1,57
	E3	24104	1,84	21093	1,61	20863	1,59
	E4	24236	1,85	24039	1,83	20721	1,58

Por conveniência a Figura 5.1 apresenta o mapa de padrões de fluxo horizontal de Taitel e Dukler (1976) com o par de velocidades superficiais medidas nas estações à montante da placa de orifício. O presente mapa bem como as linhas de transição dos padrões são para os fluidos ar comprimido e água. O eixo x representa a velocidade superficial de gás e o eixo y a velocidade superficial de líquido.

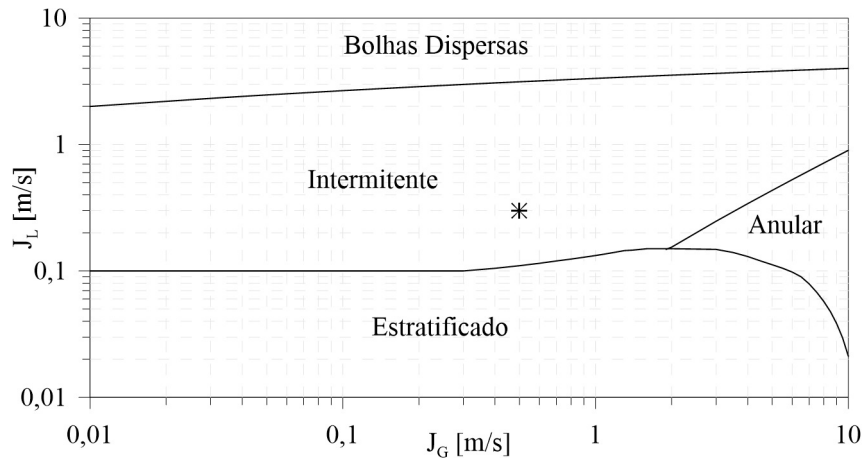


Figura 5.1: Mapa de padrões de fluxo horizontal.

## 5.2 Pressão

Uma das propriedades investigadas neste trabalho é a pressão. A passagem do escoamento intermitente através da obstrução causa ciclos de aceleração e desaceleração tanto à montante quanto à jusante da placa de orifício. Conforme o pistão de líquido passa pela obstrução, além da desaceleração do escoamento, a pressão à montante aumenta. Na passagem da bolha de gás, o escoamento é acelerado e a pressão à montante diminui. Outro efeito é a reflexão do pulso de pressão, ocasionado pelo choque do pistão de líquido com o orifício.

Nas Seções 5.2.1 e 5.2.2 serão apresentadas a influência da obstrução na pressão absoluta na seção de testes e a pressão diferencial na placa de orifício, respectivamente. A Seção 5.2.3 trata da estimativa da perda de pressão ocasionada pelo orifício e por último, na Seção 5.2.4, será avaliada a fase e o espectro do pulso de pressão induzido pela passagem intermitente do escoamento através da placa de orifício.

### 5.2.1 Pressão Absoluta e Gradiente de Pressão na Seção de Testes

Nesta seção será discutido a influência da placa de orifício no comportamento da pressão média nas estações de medição bem como seus respectivos gradientes de pressão. A Figura 5.2 apresenta a pressão absoluta média,  $\bar{P}$ , nas estações de medição e na saída da seção de testes em função do comprimento axial adimensional da seção de testes,  $z/D$ . As distâncias adimensionais das estações de medição e das placas de orifício são repetidas por conveniência na Tabela 5.3:

Tabela 5.3: Distâncias entre injetor gás-líquido, estações de medição e placas de orifício a partir de diferentes referências.

Distâncias	Injetor	E1	A	E2	E3	B	E4	C	Saída
Do injetor	<b>0</b>	153 D	169 D	307 D	551 D	632 D	870 D	886 D	1009 D
Do <i>setup</i> A	-169 D	-16 D	<b>0</b>	138 D	382 D	-	701 D	-	840 D
Do <i>setup</i> B	-632 D	-479 D	-	-325 D	-81 D	<b>0</b>	238 D	-	377 D
Do <i>setup</i> C	-886 D	-733 D	-	-579 D	-335 D	-	-16 D	<b>0</b>	123 D

As Figuras 5.2a, 5.2b e 5.2c representam os *setups* A, B e C, respectivamente. Cada uma das figuras apresenta os valores de pressão absoluta média para tubo livre ( $\square$ ),  $\sigma = 0,250$  ( $\diamond$ ),  $\sigma = 0,123$  ( $\circ$ ) e  $\sigma = 0,072$  ( $\triangle$ ). A linha vertical tracejada representa a posição axial da placa de orifício no respectivo *setup* e as linhas de tendência são representadas pelas linhas tracejadas inclinadas.

As pressões absolutas médias para o escoamento em tubo livre são repetidas por conveniência nas três figuras, com valor máximo de 97,4 kPa na estação de medição E1 e valor mínimo na descarga da seção de testes, de 94,6 kPa, resultando em um gradiente médio de pressão de -0,1396 kPa/m (veja Tabelas 5.5 e 5.6).

Nota-se nas três figuras, que conforme a razão de contração de área diminui, a pressão absoluta média à montante da placa de orifício aumenta. Após a placa de orifício, a pressão absoluta média, independente da razão de contração de área, diminui e segue os valores e a tendência do escoamento em tubo livre.

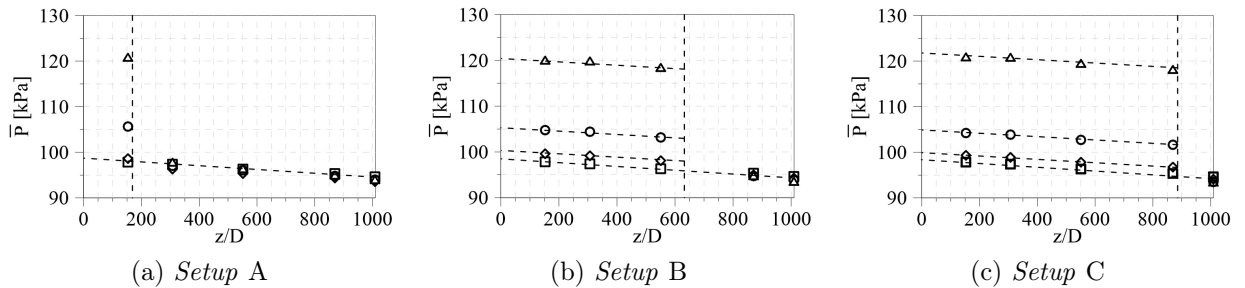


Figura 5.2: Pressão absoluta média nas estações E1 até E4 e pressão atmosférica na saída da seção de testes para tubo livre ( $\square$ ),  $\sigma = 0,250$  ( $\diamond$ ),  $\sigma = 0,123$  ( $\circ$ ) e  $\sigma = 0,072$  ( $\triangle$ ) utilizando os *setups* A, B e C.

No *setup* A, Figura 5.2a, apenas a estação E1 está à montante da obstrução. Para avaliar o aumento médio da pressão à montante da placa de orifício, toma-se a estação E1 do tubo livre como estado de referência e compara-se com os valores obtidos na estação de medição E1 para as três razões de contração de área no respectivo *setup*. O aumento médio na pressão à montante da obstrução para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 no *setup* A foi de, respectivamente, 1%, 8% e 24% em relação ao tubo livre.

No *setup* B, Figura 5.2b, as estações E1, E2 e E3 localizam-se à montante da obstrução. O aumento médio na pressão à montante da obstrução para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e

0,072 no *setup* B foi de, respectivamente, 2%, 7% e 23% em relação ao tubo livre. Para o *setup* C, exposto na Figura 5.2c, as quatro estações de medição localizam-se à montante da obstrução. O aumento médio na pressão em relação ao escoamento livre foi de 2%, 7% e 24% para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 em relação ao tubo livre.

Independentemente da distância da obstrução em relação ao injetor gás-líquido, o aumento médio da pressão à montante da placa de orifício para uma mesma razão de contração de área mostrou-se similar. A Tabela 5.4 resume o aumento médio ocasionado pela placa de orifício nos três *setups* em relação ao tubo livre.

Tabela 5.4: Aumento médio em relação ao tubo livre na pressão absoluta à montante da placa de orifício para *setups* A, B e C e  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072.

$\sigma$	<i>Setup</i> A	<i>Setup</i> B	<i>Setup</i> C	Média
$\sigma = 0,250$	1%	2%	2%	2%
$\sigma = 0,123$	8%	7%	7%	7%
$\sigma = 0,072$	24%	23%	24%	24%

Ainda na Figura 5.2, as linhas pretas tracejadas, que possuem a mesma inclinação, têm o intuito de demonstrar a similaridade do gradiente de pressão para um mesmo *setup* e diferentes razões de contração de área.

Nota-se que para o escoamento em tubo livre, podendo ser visualizado em qualquer um dos gráficos presentes na Figura 5.2, a linha que indica o gradiente de pressão é linear entre a estação E1 e a saída da seção de testes. Para o *setup* A, Figura 5.2a, não é possível estimar o gradiente de pressão à montante da placa de orifício, pois somente a E1 localiza-se antes da obstrução.

No *setup* B, Figura 5.2b, uma simples análise visual permite encontrar grande similaridade entre os gradientes de pressão para o escoamento em tubo livre e escoamento na presença da placa de orifício. No *setup* B, para cada razão de contração de área, calculou-se o gradiente de pressão entre as estações de medição E1-E2 e E2-E3, para depois extrair o valor médio. Avaliando o fenômeno à montante da placa, foi encontrado um gradiente de pressão médio para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 de, respectivamente, -0,1361 kPa/m, -0,1387 kPa/m e -0,1390 kPa/m.

Para o *setup* C, Figura 5.2c, a sequência de cálculo é determinar o gradiente de pressão entre os trechos E1-E2, E2-E3 e E3-E4 para uma mesma razão de contração de área e depois extrair o valor médio. O valor médio para o gradiente de pressão à montante da placa de orifício para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 é de, respectivamente, -0,1305 kPa/m, -0,1310 kPa/m e -0,1363 kPa/m. Destaca-se, portanto, a independência do gradiente de pressão com relação a razão de contração de área, uma vez que seus valores médios são similares.

A Tabela 5.5 apresenta os valores médios de pressão absoluta nas estações de medição e na saída da seção de testes para todas as razões de contração de área e *setups* testados,

enquanto a Tabela 5.6 reúne os valores médios do gradiente de pressão para escoamento livre e *setups* B e C à montante da placa de orifício.

Tabela 5.5: Pressão absoluta média para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  nos *setups* A, B e C.

	Estação	$\overline{P}$ kPa		
Tubo Livre	E1	97,9		
	E2	97,4		
	E3	96,3		
	E4	95,3		
	Saída	94,6		
Razão de Contração de Área	Estação	<i>Setup</i> A	<i>Setup</i> B	<i>Setup</i> C
		$\overline{P}$ kPa	$\overline{P}$ kPa	$\overline{P}$ kPa
$\sigma = 0,250$	E1	98,6	99,6	99,3
	E2	96,3	99,1	98,9
	E3	95,3	98,1	97,9
	E4	94,3	95,0	96,8
	Saída	93,6	94,3	94,1
$\sigma = 0,123$	E1	105,6	104,7	104,2
	E2	97,0	104,4	103,9
	E3	96,0	103,2	102,7
	E4	94,8	94,7	101,6
	Saída	94,0	93,8	93,5
$\sigma = 0,072$	E1	120,9	120,0	121,0
	E2	97,9	119,8	120,8
	E3	96,4	118,4	119,5
	E4	94,9	94,8	118,1
	Saída	94,0	93,6	93,5

Tabela 5.6: Gradiente médio de pressão para escoamento em tubo livre e para *setups* B e C incluindo  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  à montante da obstrução.

Tubo Livre	$\overline{dP/dz}$ kPa/m		
	-0,1396		
Razão de Contração de Área	<i>Setup</i> A	<i>Setup</i> B	<i>Setup</i> C
	$\overline{dP/dz}$ kPa/m	$\overline{dP/dz}$ kPa/m	$\overline{dP/dz}$ kPa/m
$\sigma = 0,250$	-	-0,1361	-0,1305
$\sigma = 0,123$	-	-0,1387	-0,1310
$\sigma = 0,072$	-	-0,1390	-0,1363



## 5.2.2 Pressão Diferencial na Placa de Orifício

É analisada nesta Seção a pressão diferencial na placa de orifício. A Figura 5.3 mostra a evolução temporal da pressão diferencial instantânea na placa de orifício,  $\Delta P_o$ , e seu valor médio,  $\overline{\Delta P_o}$ , para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  nos *setups* A, B e C. O sinal da pressão diferencial instantânea é representado pela linha preta contínua enquanto a pressão diferencial média é ilustrada pela linha vermelha tracejada. A principal característica do sinal instantâneo da pressão diferencial é o seu comportamento pulsátil, induzido pela passagem alternada de pistões de líquido e bolhas de gás através da placa de orifício.

A Figura 5.3a apresenta a evolução temporal da pressão diferencial instantânea e seu valor médio para as três razões de contração de área no *setup* A. A placa de orifício localiza-se 169 D à jusante do injetor gás-líquido, veja Tabela 5.3. Tal proximidade do injetor gás-líquido em relação à obstrução ocasiona uma menor interação entre as estruturas.

Na Figura 5.3b, apresenta-se o sinal da pressão diferencial e de seu valor médio no *setup* B para as três razões de contração de área. A placa de orifício no *setup* B está localizada 632 D à jusante do injetor gás-líquido, permitindo um maior volume entre o injetor e a obstrução, possibilitando uma maior interação entre as partes que compõe o escoamento, conseqüentemente alterando a periodicidade dos conjuntos pistão-bolha.

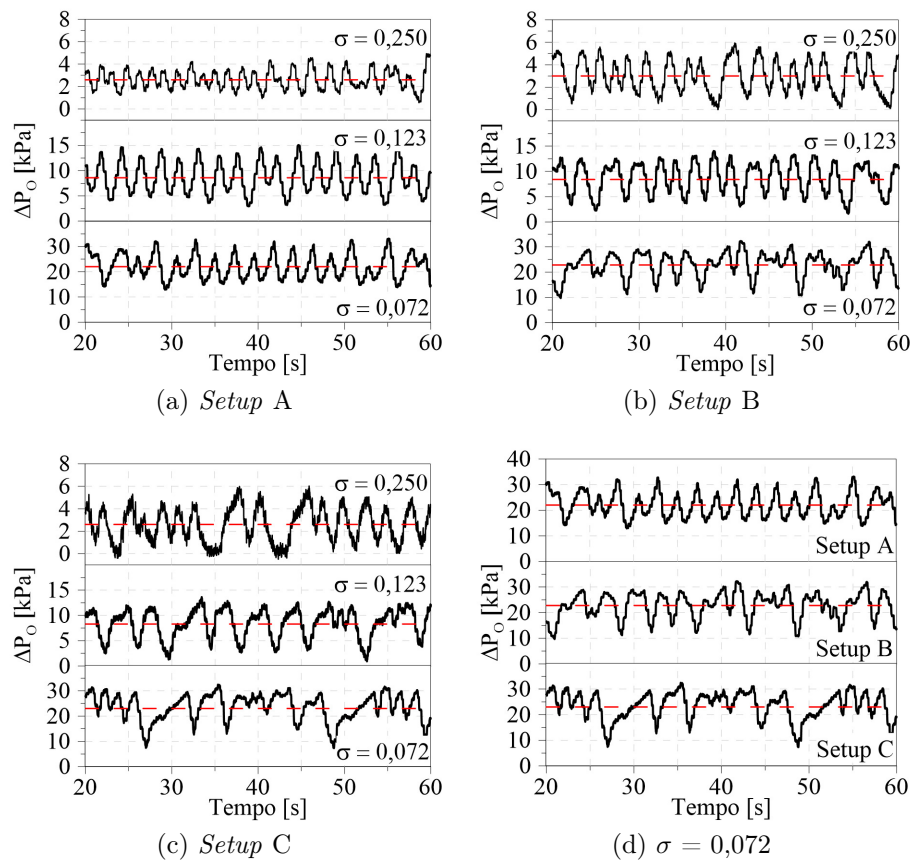


Figura 5.3: Evolução temporal da pressão diferencial instantânea na placa de orifício e seu valor médio para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  e *setups* A, B e C.

O *setup* C, ilustrado pela Figura 5.3c, apresenta a maior distância entre o injetor gás-líquido e a placa de orifício: 886 D. Ao comparar o *setup* A com *setup* C, verifica-se que o aumento da distância entre o injetor e a placa de orifício induz novas flutuações de pressão com períodos maiores. O fenômeno de quebra de bolhas, discutido na Seção 4, também contribui para a variedade nas flutuações da pressão diferencial, uma vez que pequenas bolhas de gás e pequenos pistões de líquido são gerado.

É possível avaliar uma única razão de contração de área para diferentes *setups*. A Figura 5.3d ilustra a pressão diferencial instantânea em função do tempo para  $\sigma = 0,072$  e *setups* A, B e C. Ao analisar a linha vermelha tracejada, nota-se que o valor médio da pressão diferencial se mantém constante. Tal evidência sugere que pressão diferencial média independe da posição axial da obstrução na seção de testes.

Conforme citado na Seção 3.3.1, posicionou-se a sonda de contato 0,31 D à jusante da placa de orifício, com o objetivo de capturar o comportamento instantâneo da mistura em sincronia com a pressão diferencial na obstrução. Foram coletados dados para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  no *setup* B e estão apresentados na Figura 5.4. A pressão diferencial é representada pela linha contínua preta enquanto a linha tracejada vermelha representa o valor médio. O sinal de saída da sonda de contato é a tensão adimensional normalizada  $V^*$ , onde  $V^* = 1$  representa ocorrência de líquido e  $V^* = 0$  a ocorrência de gás.

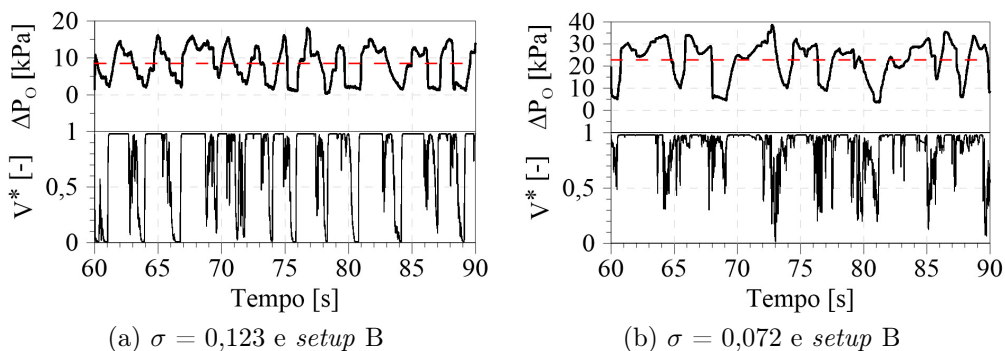


Figura 5.4: Evolução temporal da pressão diferencial na placa de orifício em sincronia com o sinal de tensão normalizada da sonda de contato. *Setup* B e  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$ .

Na Figura 5.4a, percebe-se que as flutuações de pressão em ascensão estão em sincronia com  $V^* = 1$ , portanto atribui-se tal efeito à passagem do pistão de líquido pela placa de orifício. Já as flutuações em declínio estão atribuídas à passagem da bolha de gás. A análise é equivalente para  $\sigma = 0,072$ , apresentada na Figura 5.4b.

Os picos e vales no sinal da pressão diferencial instantânea são gerados, respectivamente, por uma alta e por uma baixa pressão na tomada de pressão diferencial à montante da placa de orifício. Outra interessante característica é que as flutuações do sinal de pressão diferencial em ascensão possuem um maior período de duração do que os sinais em declínio. Tal informação sugere que o pistão de líquido necessita de um período de tempo maior do que a bolha alongada para completar sua passagem pela placa de orifício.

Como próxima etapa na análise de  $\Delta P_o$ , adiciona-se a Figura 5.5, que mostra as funções densidade de probabilidade, do inglês "*probability density function*" ou PDF, da flutuação do sinal de pressão diferencial na placa de orifício. A flutuação será identificada pelo símbolo  $\Delta P'$ . As flutuações são determinadas através da diferença entre o sinal instantâneo e o seu respectivo valor médio, sendo o valor *zero* a média das flutuações. Os valores positivos para  $\Delta P'$  representam as flutuações acima da média e os valores negativos as flutuações abaixo da média.

No *setup* A, apresentado na Figura 5.5a, nota-se uma distribuição praticamente simétrica para  $\sigma = 0,250$ . Para  $\sigma = 0,123$ , percebe-se uma distribuição bimodal, onde a moda com maior densidade encontra-se nas flutuações abaixo do valor médio. Já em  $\sigma = 0,072$ , a distribuição em uma única moda é retomada e ocorre um grande espalhamento nas flutuações.

Para o *setup* B, exposto na Figura 5.5b, novamente a distribuição é simétrica para  $\sigma = 0,250$ . Para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  uma distribuição bimodal é apresentada, com o pico de maior densidade localizado, em ambos os casos, nas flutuações acima do valor médio.

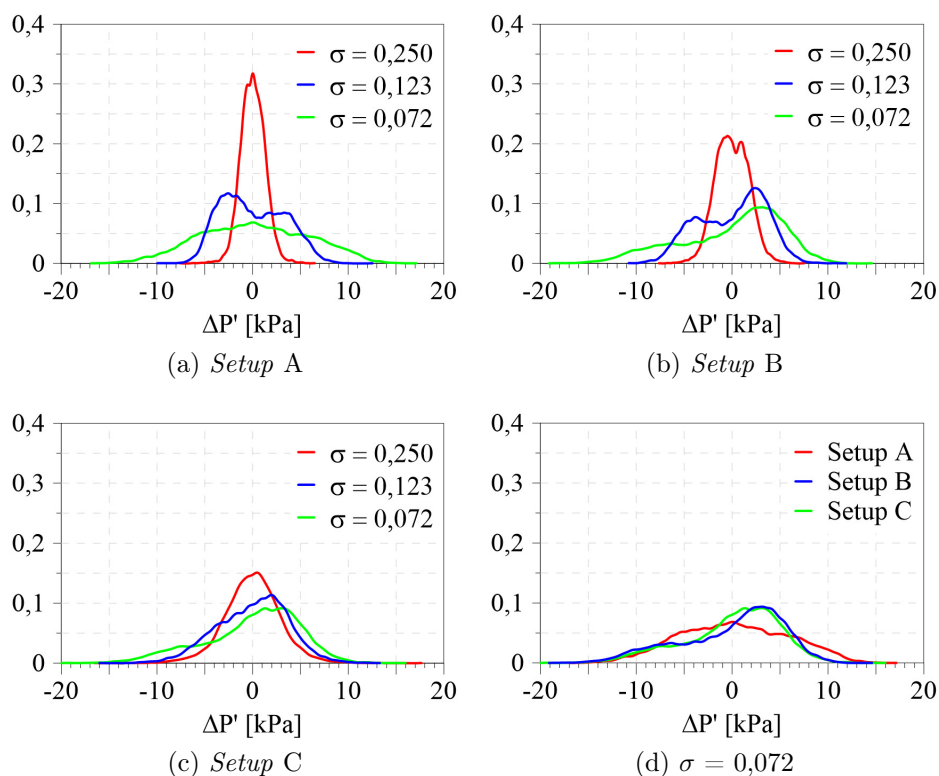


Figura 5.5: Função densidade de probabilidade da flutuação instantânea da pressão diferencial na placa de orifício para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  e *setups* A, B e C.

No *setup* C, Figura 5.5c, a distribuição se mantém simétrica para  $\sigma = 0,250$  como nos *setups* anteriores. Em  $\sigma = 0,123$ , não é apresentado o comportamento bimodal encontrado nos *setups* A e B. Para  $\sigma = 0,072$  repete o comportamento bimodal encontrado no *setup* B para a respectiva razão de contração de área. Novamente o pico de maior densidade

encontra-se nas flutuações acima do valor médio.

O efeito da distância entre o injetor gás-líquido e a placa de orifício é ilustrado na Figura 5.5d usando  $\sigma = 0,072$  e *setups* A, B e C. Nota-se para o *setup* A uma distribuição simétrica das flutuações, já para os *setups* B e C percebe-se que o pico de maior densidade se mantém nas flutuações positivas.

A análise da pressão diferencial em sincronia com o sinal da sonda de contato na Figura 5.4, demonstra que o pistão de líquido necessita de um maior período de tempo do que a bolha de gás para escoar através da obstrução. Tal comportamento é refletido nas PDFs das flutuações. Retoma-se a análise para os PDFs dos *setups* B e C para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  (linhas azuis e verdes para *setups* B e C). Notam-se modas com maiores densidades nas flutuações positivas.

Considerando que a placa de orifício no *setup* B e C localiza-se, respectivamente, 632 D e 886 D à jusante do injetor, as estruturas do escoamento possuem chance de interagir, originando maiores pistões de líquido e bolhas de gás. O pistão de líquido é responsável pelas modas acima do valor médio, pois o líquido necessita de um tempo maior para escoar através da obstrução do que o gás.

Com o objetivo de identificar as frequências características onde ocorrem as flutuações do sinal de pressão diferencial, explora-se o sinal no domínio da frequência utilizando a densidade espectral de potência, do inglês "*power spectral density*" ou PSD. A Figura 5.6 apresenta as PSDs do sinal da pressão diferencial para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  para os *setups* A, B e C.

Antes de iniciar a discussão é importante considerar que o valor médio não é exposto na análise da Figura 5.6, uma vez que valores constantes no domínio da frequência representam um pico em 0 Hz, fazendo com que somente a flutuação do sinal ao redor da média seja computada. Devido a passagem do escoamento intermitente através da placa de orifício ocorrer em baixas frequências, os eixos das abscissas para os gráficos de PSD na Figura 5.6 são expostos até 1 Hz.

Na Figura 5.6a apresentam-se as PSDs do *setup* A. Nota-se para  $\sigma = 0,250$  quatro picos de frequência: 0,30 Hz, 0,45 Hz, 0,65 Hz e 0,85 Hz, sendo o de maior potência em 0,65 Hz. Para  $\sigma = 0,123$  encontram-se duas frequências características, uma de baixa potência em 0,25 Hz e outra de maior potência em 0,45 Hz. Já em  $\sigma = 0,072$ , são encontradas as mesmas frequências que em  $\sigma = 0,123$ , porém o sinal em 0,25 Hz possui a maior potência.

Nas PSDs do *setup* B, ilustrado na Figura 5.6b, notam-se mudanças no espectro de frequência quando comparado ao *setup* A (Figura 5.6a). Quanto maior a interação das estruturas antes do escoamento passar pela obstrução, maior será o espalhamento nas faixas de frequência da PSD. Para  $\sigma = 0,250$ , percebe-se flutuações ocorrendo em várias frequências, variando de 0,10 Hz até 0,70 Hz. Ainda para o *setup* B,  $\sigma = 0,123$  apresenta um pico na frequência de 0,30 Hz. Flutuações em diferentes frequências também compõe o sinal, atingindo valores entre  $0,10 < f < 0,70$  Hz. Para  $\sigma = 0,072$ , os picos de

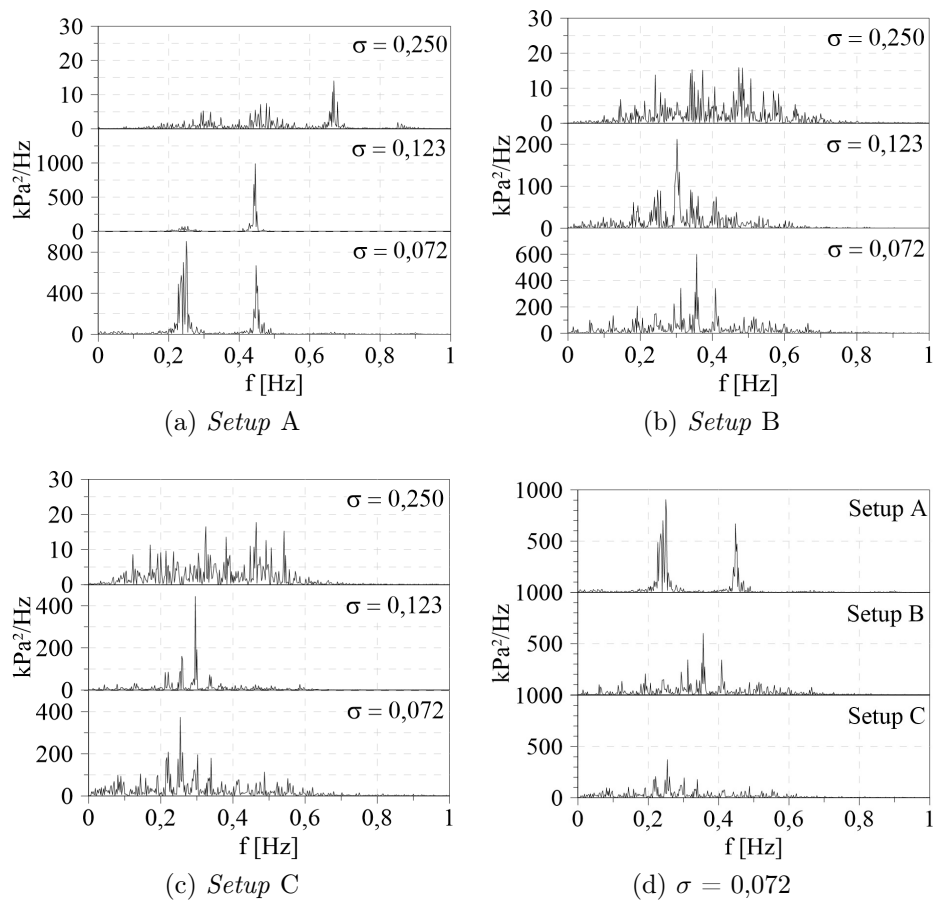


Figura 5.6: Densidade espectral de potência da pressão diferencial instantânea na placa de orifício para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  e *setups* A, B e C.

maior potência estão entre  $0,30$  Hz e  $0,40$  Hz, porém as flutuações ocorrem no intervalo semelhante ao de  $\sigma = 0,123$ , com  $0,10 < f < 0,70$  Hz.

Na Figura 5.6c apresentam-se as PSDs do *setup* C. As flutuações de pressão para  $\sigma = 0,250$  ocorrem em uma faixa de frequência entre  $0,10 < f < 0,70$  Hz. Com  $\sigma = 0,123$ , percebe-se ocorrência de flutuações entre  $0,10$  e  $0,60$  Hz, com destaque para a frequência de  $0,30$  Hz, representada pelo pico de maior potência. Em  $\sigma = 0,072$ , novamente a faixa de ocorrência se mantém entre  $0,10$  e  $0,70$  Hz e os picos com maiores potências ocorrem entre  $0,20$  Hz e  $0,40$  Hz.

Compara-se a PSD de um mesmo orifício para os diferentes *setups* na Figura 5.6d. Percebe-se surgimento de novos picos de frequência à medida que a distância entre o injetor gás-líquido e a placa de orifício aumenta. Novamente, uma maior interação entre as estruturas do escoamento induz uma maior periodicidade, fazendo com que as flutuações na pressão diferencial da placa de orifício ocorram em frequências mais baixas para *setups* B e C em relação ao *setup* A. Outra evidência experimental é que os maiores picos das PSDs não possuem relação com a frequência de passagem de golfadas, assunto abordado na Seção 5.5.

Seleciona-se a faixa do espectro entre 0,10 e 0,90 Hz onde se encontra a maior parte das possíveis frequências características. Soma-se a potência entre 0,10 e 0,90 Hz e apresenta-se a Tabela 5.7, na qual demonstra que no mínimo 90% da potência do sinal está contida no respectivo intervalo de frequências para todas as combinações entre razões de contração de área e *setups* do presente trabalho.

Tabela 5.7: Potência da pressão diferencial contida entre 0,10 e 0,90 Hz, em %.

$\sigma$	Setup A	Setup B	Setup C
$\sigma = 0,250$	90%	93%	90%
$\sigma = 0,123$	96%	97%	95%
$\sigma = 0,072$	96%	96%	95%

O valor da pressão diferencial média na placa de orifício,  $\overline{\Delta P_o}$ , e sua amplitude média,  $\overline{\Delta P'}$  são apresentados na Tabela 5.8.  $\overline{\Delta P'}$  é calculado como sendo duas vezes o desvio padrão da pressão diferencial instantânea  $\Delta P_o$ . O valor médio da pressão diferencial mostrou-se independente da posição axial da placa de orifício na seção de testes, confirmando a hipótese discutida na Figura 5.3. Os valores médios de amplitude mantêm-se similares.

Tabela 5.8: Valores médios da pressão diferencial e da flutuação na placa de orifício, em kPa.

$\sigma$	Setup A	Setup B	Setup C	Média
$\sigma = 0,250$	$2,6 \pm 1,8$	$3,0 \pm 2,6$	$2,6 \pm 2,6$	$2,7 \pm 2,4$
$\sigma = 0,123$	$8,6 \pm 6,4$	$8,4 \pm 6,8$	$8,3 \pm 5,6$	$8,5 \pm 6,2$
$\sigma = 0,072$	$22,0 \pm 10,2$	$22,8 \pm 10,4$	$23,5 \pm 9,2$	$22,8 \pm 9,8$

A pressão diferencial adimensional média,  $\overline{\Delta P_o^*}$ , é definida na Equação 5.2:

$$\overline{\Delta P_o^*} = \frac{\overline{\Delta P_o}}{\frac{1}{2}\rho_m \bar{J}^2}, \quad (5.2)$$

onde  $\rho_m = \rho_L(1 - \alpha) + \rho_G\alpha$ . A fração de vazio média, considerando escoamento em tubo livre, (verificar na Tabela 5.10, Seção 5.3) é de  $\alpha = 0,47$ . A massa específica da mistura,  $\rho_m$ , é de  $529,50 \text{ kg/m}^3$ .  $\bar{J}$  é a velocidade média da mistura ( $\bar{J}_L + \bar{J}_G$ ) de  $0,80 \text{ m/s}$ .

A Figura 5.7a mostra o comportamento crescente e linear da pressão diferencial adimensional média na placa de orifício em função de  $1/\sigma^2$ . A razão entre a flutuação média e a pressão diferencial média,  $|\overline{\Delta P'}|/\overline{\Delta P_o}$ , é apresentada na Figura 5.7b em função de  $1/\sigma^2$ . Observa-se que a razão  $|\overline{\Delta P'}|/\overline{\Delta P_o}$  decai linearmente com  $1/\sigma^2$ . Para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  a razão entre a pressão e a amplitude média é de  $0,89$ ,  $0,73$  e  $0,43$ , respectivamente.

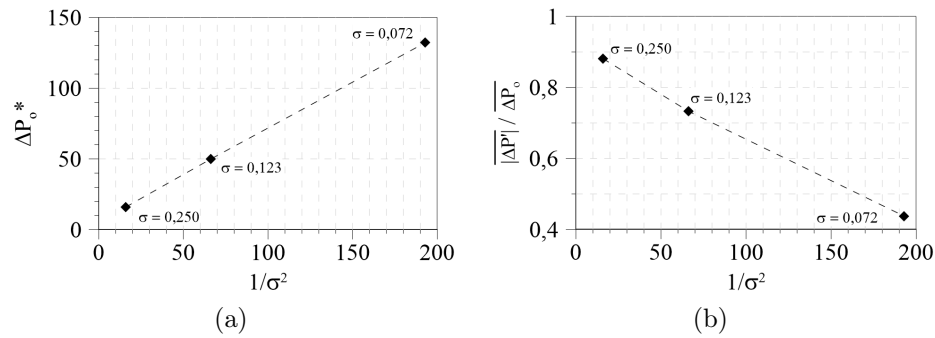


Figura 5.7: (a) pressão diferencial adimensional média em função de  $1/\sigma^2$ ; (b) razão entre flutuação média e pressão diferencial média em função de  $1/\sigma^2$ .

### 5.2.3 Estimativa da Perda de Pressão Média ( $\overline{\Delta P}_{TP}$ )

A pressão diferencial na placa de orifício é maior que a perda de pressão causada pela mesma. À jusante da obstrução, após o processo de expansão, parte da pressão diferencial é recuperada. A estimativa da perda de pressão média,  $\overline{\Delta P}_{TP}$ , em placas de orifício com furo concêntrico e bordas quadradas, é regulamentada pela norma ISO 5167-2:2003 (2003) como função da pressão diferencial média,  $\overline{\Delta P}_o$ , e está exposta na Equação 5.3:

$$\frac{\overline{\Delta P}_{TP}}{\overline{\Delta P}_o} = 1 - (\sqrt{\sigma})^{1,9}. \quad (5.3)$$

Realiza-se uma comparação entre a perda de pressão média calculada através da Equação 5.3 e a perda de pressão média estimada graficamente extrapolando as linhas de tendência presentes na Figura 5.2. Casos onde ocorre a leitura de um único ponto à montante ou à jusante da obstrução, aproximou-se a pressão até a placa de orifício utilizando o gradiente de pressão para tubo livre de  $-0,1396$  kPa/m. A Tabela 5.9 apresenta os valores médios para a perda de pressão estimada graficamente.

Tabela 5.9: Valores médios da perda de pressão estimados pela Figura 5.2, em kPa.

$\sigma$	Setup A	Setup B	Setup C	Média
$\sigma = 0,250$	1,8	2,0	2,2	2,0
$\sigma = 0,123$	8,2	7,5	7,6	7,8
$\sigma = 0,072$	22,0	22,5	23,9	22,8

Após a estimativa de  $\overline{\Delta P}_{TP}$  através do método gráfico, utiliza-se a Equação 5.3 para comparação. Para  $\overline{\Delta P}_o$  adotam-se os valores apresentados na coluna de *Média* da Tabela 5.8.

Para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  os valores encontrados para  $\overline{\Delta P}_{TP}$  através da Equação 5.3 são de  $1,99$  kPa,  $7,30$  kPa e  $20,89$  kPa com erros de  $0,3\%$ ,  $6,0\%$  e  $8,4\%$  em relação aos

respectivos valores de  $\overline{\Delta P}_{TP}$  estimados graficamente. Portanto conclui-se que é possível utilizar a Equação 5.3 para estimar a perda de pressão ocasionada por uma placa de orifício em um escoamento bifásico.

#### 5.2.4 Fase e Espectro do Pulso de Pressão

O pulso de pressão originado pelo choque do pistão de líquido com a placa de orifício é refletido e se propaga à montante da obstrução. Para avaliar a propagação do pulso de pressão, explora-se a flutuação do sinal dos transdutores de pressão nas estações de medição em sincronia com o transdutor de pressão acoplado a placa de orifício.

A Figura 5.8 apresenta a flutuação do sinal dos transdutores de pressão da placa de orifício,  $\Delta P'$ , e das estações de medição E1 até E4. A razão de contração de área selecionada para avaliar a propagação do pulso de pressão é de 0,072 nos *setups* A, B e C.

As figuras com fundo cinza escuro representam as flutuações dos sinais de pressão nas estações à montante da obstrução, a figura com fundo cinza claro representa a flutuação da pressão diferencial na placa de orifício e as figuras com fundo branco representam as flutuações nas estações à jusante da placa de orifício.

Percebe-se nas estações à montante que os picos e vales estão em fase com as ocorrências na placa de orifício. Para as estações à jusante da placa de orifício, a sincronia é existente porém defasada em  $\pi$  radianos. A passagem alternada de pistão de líquido e bolhas de gás pela obstrução causa a defasagem na fase da flutuação.

Conforme o pistão de líquido passa pela obstrução, sua respectiva velocidade à montante é reduzida, o regime de jato é formado e a pressão diferencial na placa de orifício aumenta gradativamente. As flutuações à montante estão em fase com as flutuações da pressão diferencial pois o aumento na pressão é refletido. O pistão de líquido escoar pela obstrução mais lentamente do que a bolha de gás, gerando uma queda na taxa de transferência de volume entre as tubulações montante e jusante da obstrução. Tal queda na taxa de transferência induz a queda de pressão na tubulação à jusante do orifício, pois o volume injetado à jusante durante a passagem do pistão de líquido pelo orifício é menor.

Durante a passagem da bolha de gás pela placa de orifício, ocorre o oposto. A taxa de transferência de volume entre as seções montante e jusante aumenta significativamente, diminuindo a pressão à montante e transferindo o aumento de pressão à jusante do orifício, uma vez que a tubulação à jusante recebe rapidamente todo o volume da bolha de gás. Esse fenômeno é responsável pela defasagem em  $\pi$  radianos nos sinais de flutuação de pressão à montante e à jusante da obstrução.

A defasagem na fase do sinal de pressão é bem ilustrada pelo *setup* A, veja Figura 5.8a. Percebe-se que os picos e vales das flutuações da estação de medição E1 e da placa de orifício estão em fase, porém nas estações E2, E3 e E4 as flutuações estão defasadas



em  $\pi$  radianos. A Figura 5.8c apresenta *setup C* com todas as estações à montante da obstrução. Nota-se que as flutuações nas estações E1, E2, E3 e E4 estão em fase com a placa de orifício.

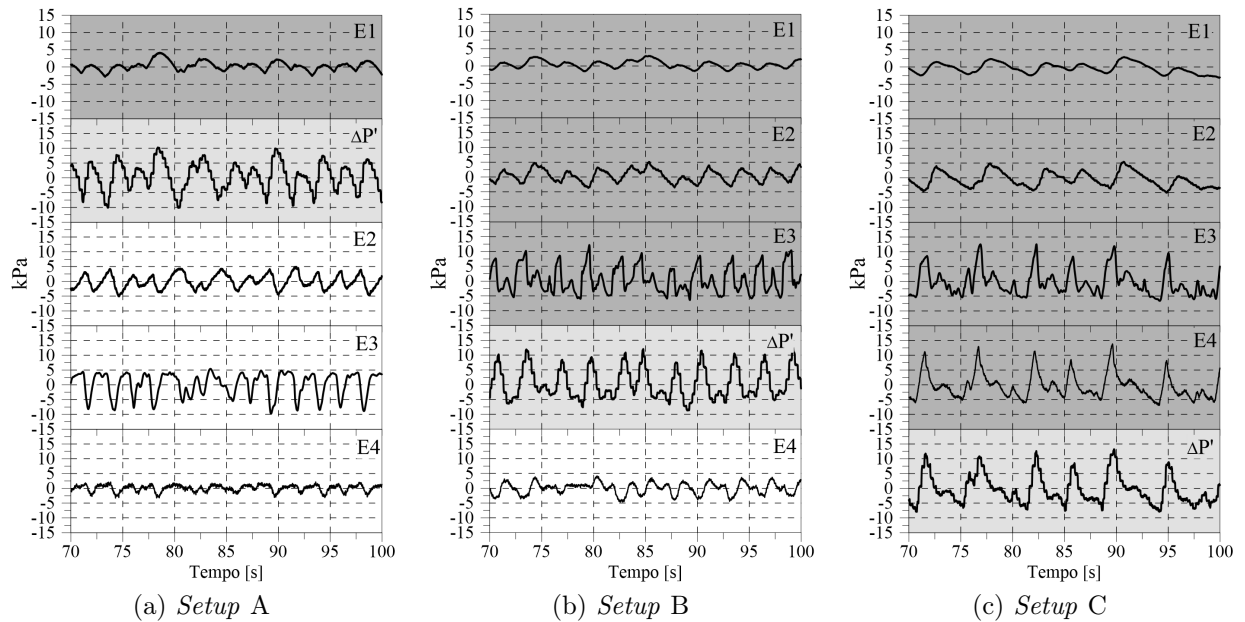


Figura 5.8: Flutuações instantâneas da pressão diferencial e da pressão nas estações de medição E1 até E4 para  $\sigma = 0,072$  nos *setups A, B e C*.

Além do mais, no *setup C*, os picos e vales das estações E1 e E2 possuem pequeno deslocamento no tempo em função da distância entre as respectivas estações de medição e a velocidade de propagação da onda de pressão, fazendo com que o aumento na pressão ocorra posterior às estações de medição mais próximas (E3 e E4).

Adiciona-se a Figura 5.9, que expõe as densidades espectrais de potência (PSD) para os sinais da Figura 5.8. A sequência de cores é a mesma utilizada na figura anterior. Nota-se que as frequências características encontram-se na faixa de 0,10 Hz e 0,90 Hz. Os picos de potência encontrados na PSD da flutuação de pressão diferencial na placa de orifício também são encontrados nas flutuações de pressão nas estações de medição, tanto à montante quanto à jusante, indicando que os pulsos de pressão originados pela passagem do escoamento intermitente através da placa de orifício regulam o sinal de pressão na seção de testes.

Atribui-se a queda da potência na PSD da estação de medição E1 devido sua proximidade do injetor gás-líquido, uma vez que a injeção de fluidos na seção de testes é constante e com pequenas flutuações (Figura 3.14).

A queda da potência na estação de medição E4 para os *setups A e B* é ocasionada pela sua localização na seção de testes. Por estar instalada próximo da saída da seção de testes e pela pressão na descarga ser a pressão atmosférica, as flutuações no sinal são pequenas.

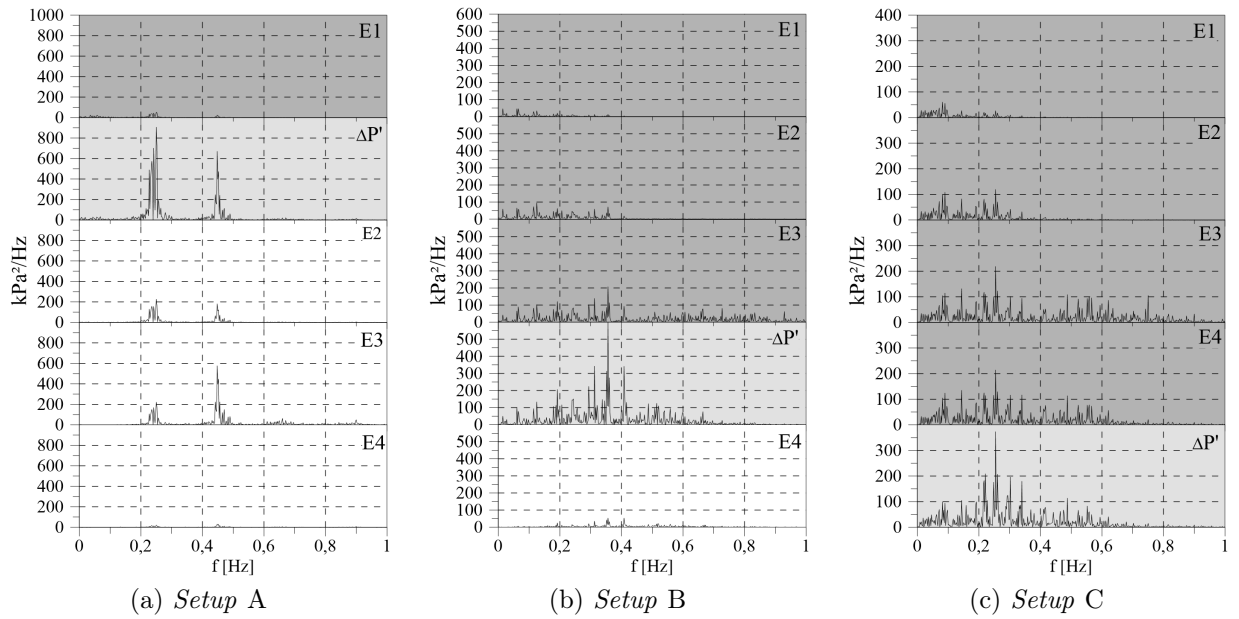


Figura 5.9: Densidade espectral de potência flutuação da pressão diferencial instantânea na placa de orifício e das flutuações de pressão nas estações de medição para  $\sigma = 0,072$  nos *setups* A, B e C.

### 5.3 Fração de Vazio

Apresenta-se nesta Seção, sinais instantâneos em função do tempo, funções densidade de probabilidade e valores médios de fração de vazio,  $\alpha$ , para escoamento em tubo livre e para os escoamentos com placa de orifício.

Na Figura 5.10 são apresentados os sinais de fração de vazio na seção transversal em função do tempo para o escoamento em tubo livre (estado de referência) e para escoamento com  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  no *setup* A, nas estações de medição E1 e E4.

A Figura 5.10a apresenta a estação de medição E1 no *setup* A. A estação E1 localiza-se  $153 D$  à jusante do injetor e  $16 D$  à montante da placa de orifício, veja Tabela 5.3. É possível avaliar os efeitos da placa de orifício no desenvolvimento do escoamento devido a proximidade da estação de medição para com o injetor. Para escoamento em tubo livre, percebe-se a presença de pistões de líquido e bolhas de gás de diversos tamanhos, comprovando que o escoamento está em fase de desenvolvimento. Em  $\sigma = 0,250$  nota-se a semelhança no sinal instantâneo de  $\alpha$  para tubo livre. Para  $\sigma = 0,072$  percebe-se a ocorrência de pistões de líquido aerados com grandes perturbações no sinal de fração de vazio.  $\sigma = 0,123$  apresenta um estado intermediário entre  $\sigma = 0,250$  e  $0,072$ .

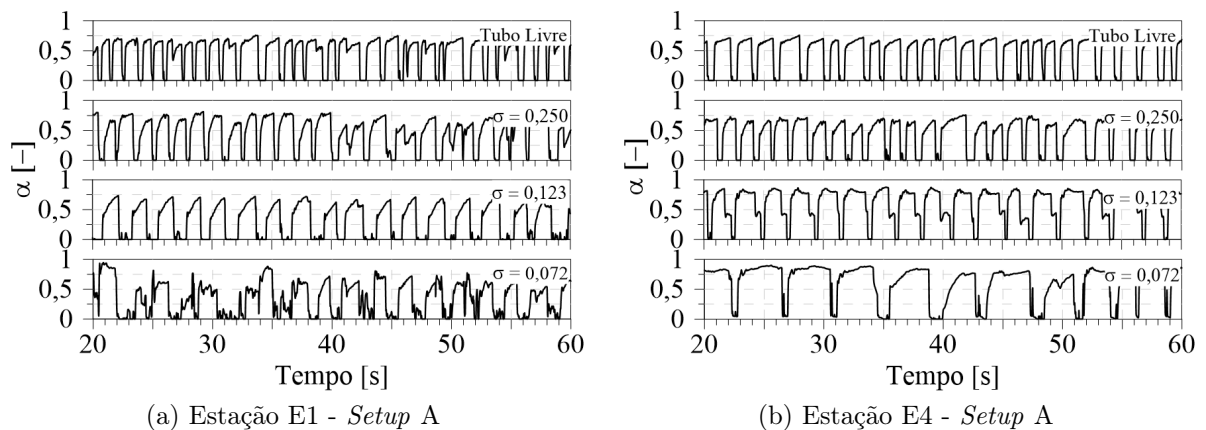


Figura 5.10: Evolução temporal da fração de vazio nas estações E1 e E4 para tubo livre e para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  presentes no *setup* A.

A estação E4 no *setup* A, exposta na Figura 5.10b, está situada 701 D à jusante da placa de orifício. Permite-se, portanto, avaliar o desenvolvimento do escoamento após passar pela obstrução. Nota-se para escoamento em tubo livre, uma periodicidade definida com redução nas interações entre estruturas e pistão de líquido não aerado.

Para  $\sigma = 0,250$ , o sinal de  $\alpha$  apresenta regularidade semelhante ao escoamento em tubo livre com ocorrências de pistões aerados. Em  $\sigma = 0,123$ , pistões de líquido aerados e não aerados são capturados bem como bolhas de gás com *staircase*, fenômeno detalhado em Netto, Fabre e Peresson (1999). Para orifício com  $\sigma = 0,072$ , revelam-se pistões de líquido aerados e grandes bolhas de gás. Ainda na estação E4, ao comparar somente a fração de vazio em função do tempo para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$ , percebe-se grande diferença nos sinais, confirmando que após passar pela placa de orifício, a fração de vazio instantânea é totalmente dependente da razão de contração de área e mesmo 701 D à jusante da placa de orifício as perturbações ainda são encontradas.

A Figura 5.11 revela o sinal instantâneo de  $\alpha$  no *setup* B para as estações de medição E1 e E3. A estação de medição E1 localiza-se 153 D à jusante do injetor e 479 D à montante da obstrução. A estação E3 está situada 551 D à jusante do injetor e 81 D à montante da placa de orifício.

Na estação E1 para *setup* B, apresentada na Figura 5.11a, a fração de vazio para  $\sigma = 0,250$  possui fraca influência da placa de orifício, com comportamento semelhante ao escoamento em tubo livre. Para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$ , encontra-se grande irregularidade no sinal instantâneo, com  $\alpha$  atingindo valores maiores que  $0,80$ .

A Figura 5.11b mostra a estação de medição E3 no *setup* B. A respectiva estação localiza-se 551 D à jusante do injetor e 81 D a montante da obstrução. Percebe-se para  $\sigma = 0,250$ , maiores bolhas quando comparado ao tubo livre.  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  apresenta uma maior quantidade de pistões de líquido aerados. Em  $\sigma = 0,072$ , nota-se a casos em que  $\alpha$  está próximo de  $1,0$ .

O efeito de aceleração no escoamento é responsável por diminuir o comprimento da bolha e afinar o filme de líquido, gerando alterações no sinal instantâneo de fração de vazio. A tendência para uma aceleração de grande magnitude é diminuir o filme de líquido, ao ponto da seção transversal ser tomada pela fase gasosa. Tais efeitos intensificam-se conforme o escoamento se aproxima da obstrução.

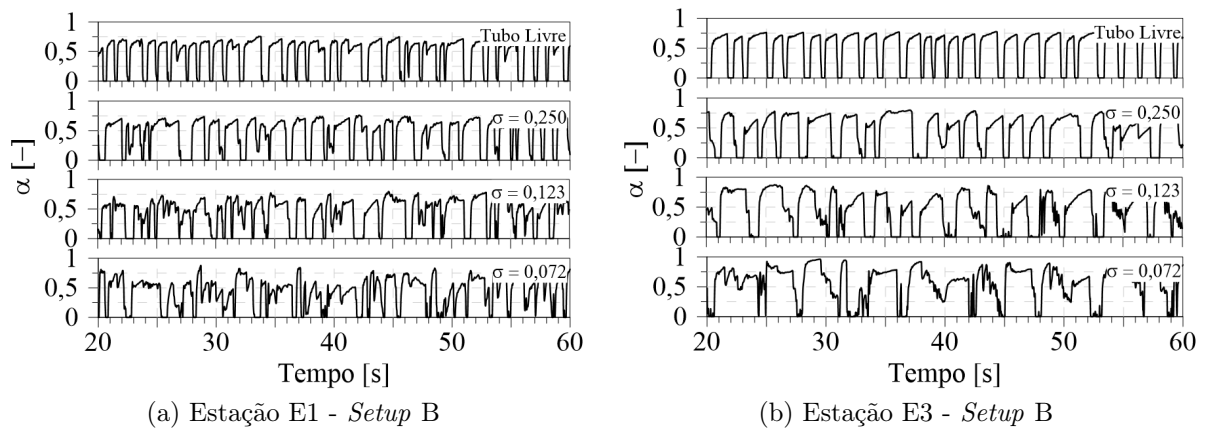


Figura 5.11: Evolução temporal da fração de vazio nas estações E1 e E3 para tubo livre e para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  presentes no *setup* B.

A Figura 5.12 expõe a fração de vazio instantânea em função do tempo no *setup* C. A obstrução localiza-se 886 D à jusante do injetor gás-líquido. As estações avaliadas são E1 e E4, localizadas 733 D e 16 D à montante da placa de orifício.

Nota-se na estação E1, Figura 5.12a, que mesmo 733 D distante do orifício, a formação do escoamento intermitente é perturbada, inclusive para o caso mais suave de obstrução.  $\sigma = 0,250$  apresenta pequenas modificações no desenvolvimento e conforme a razão de contração de área diminui a influência da obstrução aumenta, gerando grandes irregularidades em  $\alpha$ , tornando claro os efeitos da placa de orifício na formação do escoamento. Confirma-se, portanto, que efeitos propagados à montante da placa de orifício atingem a entrada da seção de testes alterando desenvolvimento do escoamento.

Na estação E4, Figura 5.12b, por localizar-se 16 D à montante da obstrução, permite-se avaliar a forma de  $\alpha$  na vizinhança do orifício. Escoamento em tubo livre apresenta desenvolvimento e menor interação entre estruturas quando comparado a estação de medição E1. Nota-se para as três razões de contração de área uma queda no valor instantâneo de  $\alpha$  devido à ocorrência de um maior filme de líquido próximo da obstrução, bem como a presença de pistão de líquido aerado, reforçando a hipótese de que o escoamento é modificado na vizinhança do orifício, em concordância com Bertola (2002).

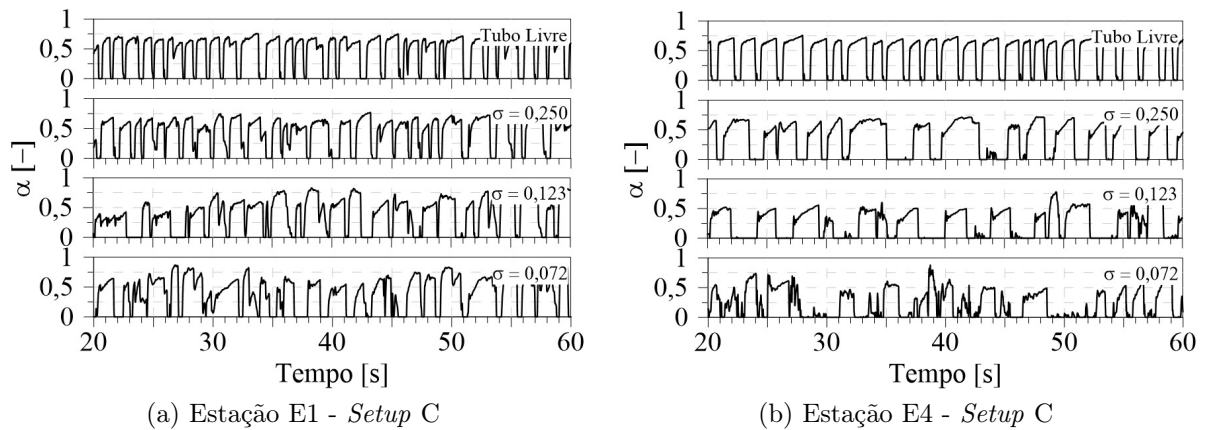


Figura 5.12: Evolução temporal da fração de vazio nas estações E1 e E4 para tubo livre e para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  presentes no *setup C*.

A Figura 5.13 apresenta os valores médios de fração de vazio,  $\bar{\alpha}$ , nas estações de medição E1 até E4 para *setups A, B e C*, onde: escoamento em tubo livre ( $\square$ ),  $\sigma = 0,250$  ( $\diamond$ ),  $\sigma = 0,123$  ( $\circ$ ) e  $\sigma = 0,072$  ( $\triangle$ ). As linhas pretas tracejadas representam a posição axial da placa de orifício na seção de testes para os respectivos *setups*.  $\bar{\alpha}$  para tubo livre é utilizado como estado de referência e repetido por conveniência para três *setups* com valor médio de  $0,47 \pm 0,01$  (veja Tabela 5.10).

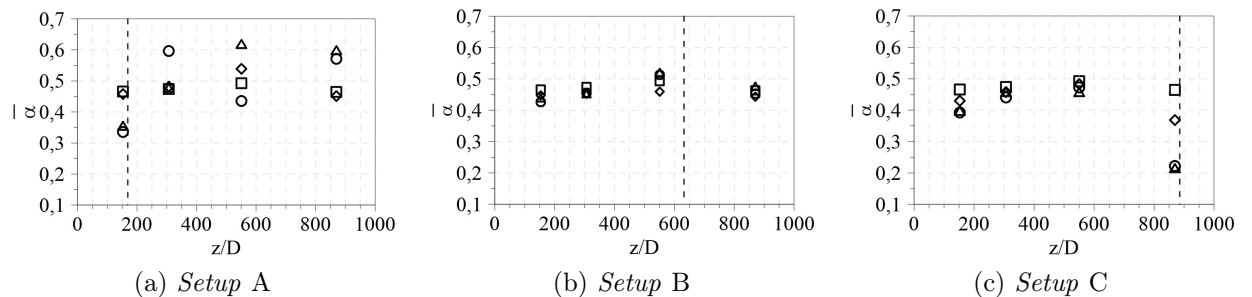


Figura 5.13: Fração de vazio média nas estações E1 até E4 para *setups A, B e C*.

Legenda: tubo livre ( $\square$ ),  $\sigma = 0,250$  ( $\diamond$ ),  $\sigma = 0,123$  ( $\circ$ ) e  $\sigma = 0,072$  ( $\triangle$ ).

Na Figura 5.13a, *setup A*, somente a estação E1 está a montante da obstrução e nota-se, para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$ , um decréscimo no valor médio em comparação ao tubo livre. Devido a estação E1 estar localizada  $16 D$  à montante do orifício, é possível capturar a variação local na espessura do filme de líquido, refletindo no valor de  $\bar{\alpha}$ . Percebe-se grande variação em  $\bar{\alpha}$  para as estações E2, E3 e E4, uma vez que o escoamento está submetido a um novo processo de desenvolvimento após passar pela placa de orifício.

A Figura 5.13b apresenta o *setup B*, que possui as estações E1, E2 e E3 à montante e E4 à jusante da obstrução. Nas estações à montante,  $\bar{\alpha}$  mantém-se próximo do escoamento livre para as três razões de contração de área. Os valores médios entre as estações à montante da placa de orifício para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  são de  $0,45$ ,  $0,46$  e  $0,47$

respectivamente, enquanto que para o escoamento livre é de 0,48. À jusante, na estação E4, os valores para  $\bar{\alpha}$  coincidem com o valor para tubo livre.

Tabela 5.10: Fração de vazio média nas estações de medição E1 até E4 para tubo livre e para  $\sigma = 0,250, 0,123$  e  $0,072$  presentes *setups* A, B e C.

	Estação	$\bar{\alpha}$		
		-		
Tubo Livre	E1	0,47		
	E2	0,47		
	E3	0,49		
	E4	0,46		
Razão de Contração de Área	Estação	<i>Setup</i> A	<i>Setup</i> B	<i>Setup</i> C
		$\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha}$	$\bar{\alpha}$
		-	-	-
$\sigma = 0,250$	E1	0,46	0,45	0,43
	E2	0,48	0,45	0,46
	E3	0,54	0,46	0,48
	E4	0,45	0,44	0,37
$\sigma = 0,123$	E1	0,34	0,43	0,39
	E2	0,60	0,46	0,44
	E3	0,44	0,51	0,47
	E4	0,57	0,45	0,22
$\sigma = 0,072$	E1	0,35	0,44	0,40
	E2	0,48	0,45	0,46
	E3	0,62	0,52	0,46
	E4	0,60	0,48	0,22

Já no *setup* C, Figura 5.13c, todas as estações de medição localizam-se à montante da obstrução. Nas estações E1, E2 e E3, o valor de  $\bar{\alpha}$  para  $\sigma = 0,250, 0,123$  e  $0,072$  são semelhantes ao escoamento livre. A exceção aplica-se na estação E4, localizada 16 D à montante da obstrução, onde os valores de  $\bar{\alpha}$  decrescem em relação ao escoamento livre. A queda no valor médio pode ser observada na Figura 5.12b, onde a fração de vazio instantânea é menor.

A mesma análise equivale para a Figura 5.13a, onde a estação E1 no *setup* A também está localizada 16 D à montante da placa de orifício. Quando comparadas as estações E1 no *setup* A e E4 no *setup* C, percebe-se a mesma queda em seu valor médio, garantindo que a obstrução altera o escoamento em sua vizinhança, aumentando a espessura do nível de líquido e reduzindo a fração de vazio.

Em relação aos valores médios de  $\alpha$ : à montante da obstrução,  $\bar{\alpha}$  segue o comportamento do escoamento livre em todos os *setups*, porém à montante da placa de orifício, em distâncias 16 D ou menores,  $\bar{\alpha}$  diminui conforme atestado em Bertola (2002). Os valores médios expostos na Figura 5.13 são apresentados na Tabela 5.10 para todas as razões de contração de área e todos os *setups*, incluindo o escoamento em tubo livre.

A função densidade de probabilidade (PDF) da fração de vazio,  $\alpha$ , é apresentada na Figura 5.14. A Figura é composta por uma tabela com quatro linhas e três colunas, onde as linhas representam as estações de medição E1, E2, E3 e E4 enquanto as colunas correspondem aos *setups* A, B e C.

O escoamento em tubo livre e os escoamentos com orifício são identificados por: tubo livre (—),  $\sigma = 0,250$  (—),  $\sigma = 0,123$  (—) e  $\sigma = 0,072$  (—). As Figuras com fundo cinza representam estações de medição localizadas à montante da obstrução e as figuras com fundo branco correspondem às estações à jusante.

A presença da placa de orifício na seção de testes é responsável por modificar a forma da PDF de fração de vazio. Conforme a razão de contração de área diminui, ocorre um espalhamento na distribuição do PDF, com queda significativa na densidade. O formato do PDF do escoamento em tubo livre, em todas as estações de medição, apresenta uma grande densidade para  $\alpha = 0$ , representando o pistão de líquido não aerado. Para a bolha de gás, as ocorrências iniciam em  $\alpha = 0,40$  estendendo-se até 0,80. A faixa entre  $0,05 < \alpha < 0,40$  possui poucas ocorrências.

Iniciando a comparação pelo *setup* A, na Figura 5.14, a estação E1 está 16 D à montante da obstrução. À medida que  $\sigma$  diminui, nota-se o deslocamento das modas para esquerda em direção aos baixos valores de fração de vazio, bem como a ocorrência de ar no pistão de líquido com  $\alpha \approx 0,05$ .

Ainda no *setup* A, nas estações à jusante (E2, E3 e E4), o escoamento desenvolve-se novamente. O desenvolvimento do escoamento, após passar pela obstrução, depende de características particulares em relação à razão de contração de área e coeficiente de descarga no orifício. Avaliando as três estações à jusante para  $\sigma = 0,250$  (linha vermelha), nota-se um comportamento próximo ao do escoamento em tubo livre principalmente na estação E4, onde o escoamento já está próximo do desenvolvimento e conseqüentemente está recuperando seu formato original. Para  $\sigma = 0,123$  (linha azul), percebe-se um desenvolvimento intermediário entre  $\sigma = 0,250$  e  $0,072$ , com a presença de três picos nos PDFs, relatando a presença do fenômeno de *staircase* na cauda da bolha em  $\alpha \approx 0,40$ . Já  $\sigma = 0,072$ , a partir da estação E3, apresenta o maior deslocamento para valores altos de fração de vazio, fator evidenciado na estação E4. Portanto, conforme a razão de contração de área diminui, maior é o deslocamento para a direita do pico de alta fração de vazio nas estações à jusante da obstrução. Isto pode ser verificado através de  $\alpha$  em função do tempo na Figura 5.10b, onde o comprimento das bolhas de gás apresenta forte dependência da razão de contração de área.

Na coluna do *setup* B, Figura 5.14, as estações de medição localizadas à montante da obstrução são E1, E2 e E3. À medida que a razão de contração de área diminui e o escoamento avança entre as estações de medição, nota-se um deslocamento para a direita com queda na densidade, aumentando a faixa de probabilidade de ocorrência. Este fenômeno pode ser melhor observado em  $\sigma = 0,072$ , onde na estação de medição E3

a probabilidade de ocorrência para  $\alpha$  está entre 0,20 e 1,0 com densidade similar próxima de 2,0.

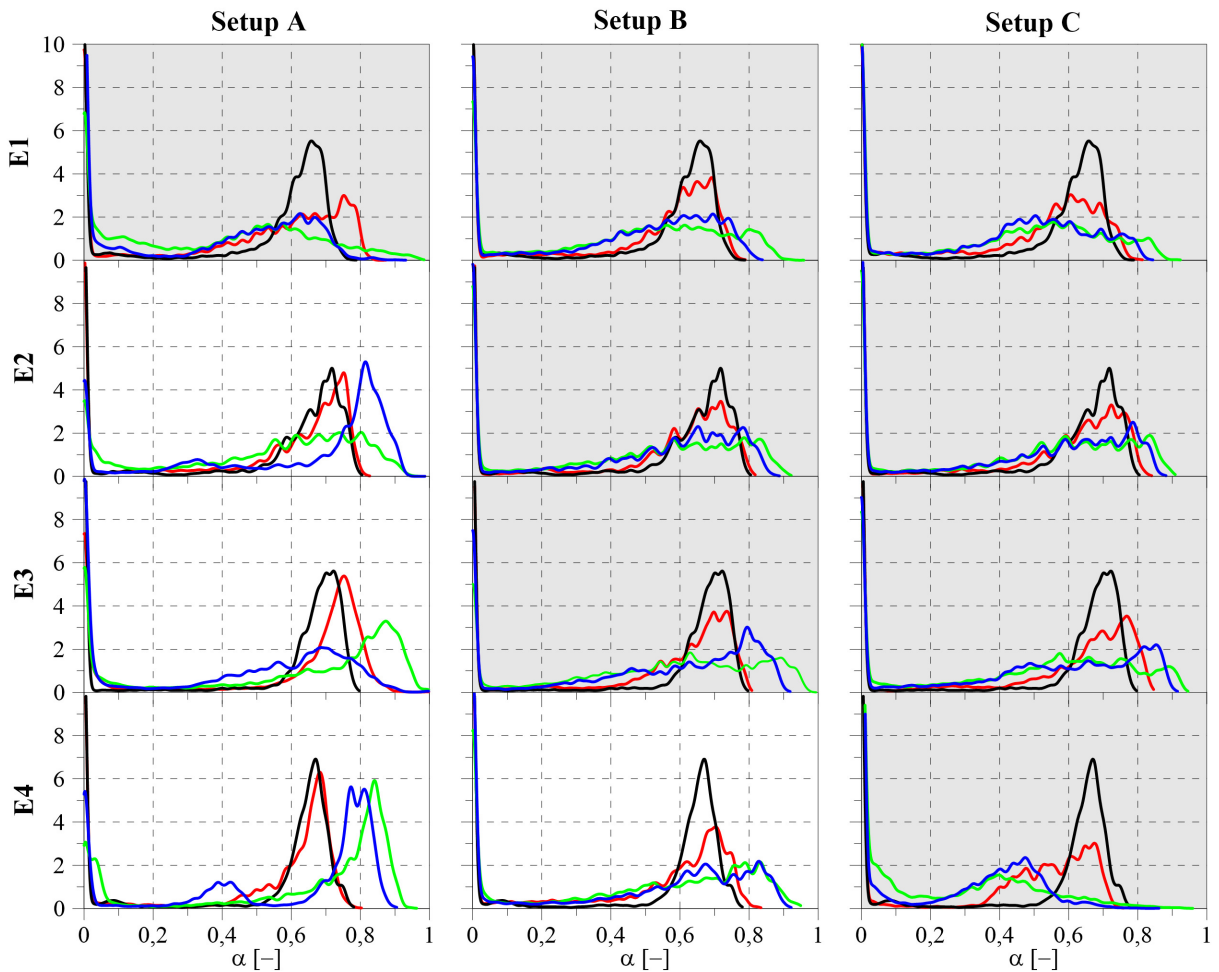


Figura 5.14: Função densidade de probabilidade da fração de vazio instantânea nas estações de medição para tubo livre e para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  nos *setups* A, B e C. Legenda: tubo livre (—),  $\sigma = 0,250$  (—),  $\sigma = 0,123$  (—),  $\sigma = 0,072$  (—).

No *setup* C, Figura 5.14, todas as estações de medição localizam-se à montante da obstrução. As PDFs de  $\alpha$  nas estações de medição E1, E2 e E3 possuem formato similar às do *setup* B. A exceção aplica-se na estação de medição E4, que está localizada somente 16 D à montante da singularidade. Como discutido anteriormente, o filme de líquido aumenta de espessura na vizinhança da placa de orifício devido às alterações locais impostas pela singularidade. Portanto, na estação E4 do *setup* C, percebe-se o deslocamento para a esquerda à medida que a razão de contração de área diminui.

É possível comparar a influência da posição axial da placa de orifício ao longo da seção de testes, utilizando os PDFs de fração de vazio. Para isto, analisa-se a estação de medição E1 para os três *setups* apresentados. A estação de medição E1 está localizada 16 D, 479 D e 733 D à montante da obstrução para os *setups* A, B e C, respectivamente. No *setup* A, por estar próximo da obstrução, a estação de medição E1 capta os efeitos



do escoamento na proximidade da placa de orifício com grande alteração no formato do PDF. Para os *setups* B e C, os PDFs apresentam grande semelhança pois estão distantes da obstrução.

As PDFs de fração de vazio para as estações de medição E1 no *setup* A e E4 no *setup* C estão ambas localizadas 16 D à montante da obstrução. Nota-se o deslocamento das distribuições para a esquerda em direção aos baixos valores de fração de vazio, conforme a razão de contração de área diminui.

O aumento na altura de filme de líquido próximo da placa de orifício é responsável pela ocorrência de menores valores de fração de vazio. Os PDFs da estação E1 no *setup* A e E4 no *setup* C captam as respectivas alterações. Isto reforça a afirmação de que o escoamento é reformulado em distâncias menores ou iguais a 16 D à montante da obstrução, independentemente da posição da placa de orifício na seção de testes.

Resumindo: a placa de orifício altera as distribuições em relação ao escoamento livre. Os picos de altas frações de vazio, correspondentes à bolha alongada, sofrem um espalhamento conforme a razão de contração de área diminui. A placa de orifício diminui a fração de vazio em distâncias iguais ou menores que 16 D à montante da obstrução. Ocorre um entranhamento entre as fases gasosa e líquida, fazendo com que as distribuições dos fluidos não se concentrem somente na bolha alongada ou no pistão de líquido, dando origem ao pistão de líquido aerado. Os fenômenos de aceleração, desaceleração e quebra de bolhas apresentados na Seção 4 alteram a distribuição da fração de vazio localmente.

Apesar das diferenças encontradas nas distribuições, os valores médios da fração de vazio em escoamento com obstrução apresentaram semelhança quando comparados aos valores médios para tubo reto. As razões para esse resultado experimental ainda não estão claras, porém uma das possíveis explicações é o fato de que as velocidades superficiais mantiveram-se constantes em todas as situações.

## 5.4 Velocidade de Translação do Nariz da Bolha

A velocidade média de translação do nariz da bolha alongada,  $\overline{u_T}$ , é apresentada na Figura 5.15 e quantificada na Tabela 5.11 para o tubo livre e para escoamentos com orifício. Na Figura 5.15 segue-se a mesma simbologia utilizadas para valores médios de pressão absoluta e fração de vazio: tubo livre ( $\square$ ),  $\sigma = 0,250$  ( $\diamond$ ),  $\sigma = 0,123$  ( $\circ$ ) e  $\sigma = 0,072$  ( $\triangle$ ). A linha preta tracejada representa a posição axial da placa de orifício nos *setups* A, B e C. A velocidade média de translação do nariz da bolha alongada para o escoamento em tubo livre é de 0,95 m/s e se mantém constante nas quatro estações de medição, veja Tabela 5.11.

Na Tabela 5.11 para o *setup* A, nota-se que na estação de medição E1,  $\overline{u_T}$  para  $\sigma = 0,250$  é semelhante ao escoamento livre e para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$   $\overline{u_T}$  decresce. Após a passagem pela obstrução,  $\sigma = 0,250$  segue os valores do escoamento em tubo livre,

demonstrando que o efeito da respectiva razão de contração de área na velocidade de translação do nariz da bolha é fraco. Para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  as alterações são mais significantes, com grandes oscilações nos valores médios. Por exemplo: na Tabela 5.11 para  $\sigma = 0,123$ , a velocidade média de translação do nariz da bolha na estação de medição E2 é de  $1,41$  m/s, porém na estação E3 decai para  $0,81$  m/s e aumenta novamente na estação E4 para  $1,54$  m/s. Estas grandes modificações nos valores médios demonstram que o escoamento está passando por um novo processo de desenvolvimento, que está ligado ao regime de jato à jusante do orifício.

No *setup* B, três estações de medição localizam-se à montante da placa de orifício: E1, E2 e E3. Da Tabela 5.11, nota-se que à montante da obstrução  $\sigma = 0,250$  segue com fraca alteração nos valores médios com relação ao tubo livre. Os fenômenos de aceleração e desaceleração da velocidade de translação do nariz da bolha para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  são maiores. Através deste processo, o número de bolhas com alta velocidade cresce à medida que o escoamento se aproxima da placa de orifício, fazendo com que o valor médio aumente. Após a obstrução,  $\overline{u_T}$  para  $\sigma = 0,250$  coincide com o tubo livre e para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  seguem aumentando.

O *setup* C possui todas as estações localizadas à montante da obstrução. Novamente, o escoamento para  $\sigma = 0,250$  é semelhante com o escoamento em tubo livre até a estação de medição E3, sofrendo uma queda na estação de medição E4. Para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$ , os valores de  $\overline{u_T}$  aumentam até a estação E3, porém na estação E4 sofrem uma significativa queda.

No *setup* C para  $\sigma = 0,123$ , o valor médio da velocidade de translação do nariz da bolha alongada na estação de medição E3 é de  $1,14$  m/s e na estação de medição E4 decresce para  $0,64$  m/s, resultando em uma queda de 43% em  $\overline{u_T}$ . Para  $\sigma = 0,072$ , os valores médios para a velocidade de translação do nariz da bolha são de  $1,28$  m/s e  $0,87$  m/s nas estações E3 e E4, respectivamente. A queda no valor médio, neste caso, é de 32%.

Compara-se, portanto, a estação de medição E1 no *setup* A e a estação de medição E4 no *setup* C. Ambas estações localizam-se 16 D à montante da obstrução no respectivo *setup*. Verifica-se a queda em  $\overline{u_T}$  para ambos os casos, novamente reforçando a suposição de que o escoamento é reorganizado na vizinhança da placa de orifício, independente de sua posição axial na seção de testes. As alterações em  $u_T$  são melhores discutidas na análise das funções densidade de probabilidade na Figura 5.16.

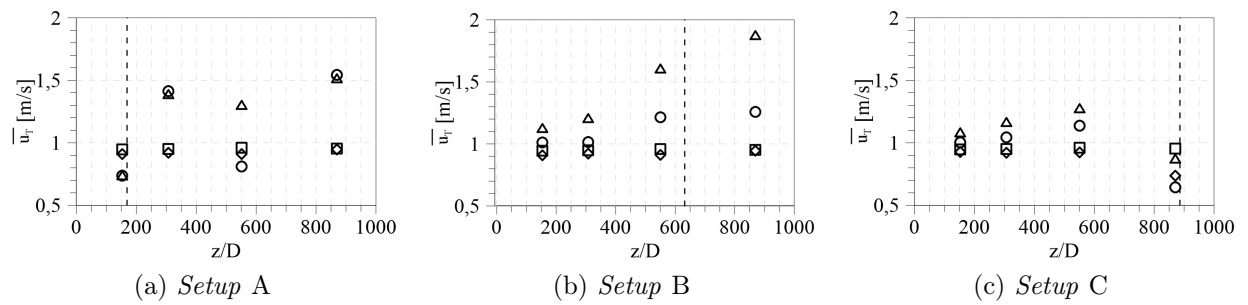


Figura 5.15: Velocidade média de translação do nariz da bolha alongada nas estações E1 até E4 para *setups* A, B e C. Legenda: tubo livre ( $\square$ ),  $\sigma = 0,250$  ( $\diamond$ ),  $\sigma = 0,123$  ( $\circ$ ) e  $\sigma = 0,072$  ( $\triangle$ ).

Tabela 5.11: Velocidade média de translação do nariz da bolha alongada nas estações de medição E1 até E4 para tubo livre e para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  presentes *setups* A, B e C.

	Estação	$\bar{u}_T$ m/s		
Tubo Livre	E1	0,95		
	E2	0,95		
	E3	0,95		
	E4	0,95		
Razão de Contração de Área	Estação	<i>Setup</i> A	<i>Setup</i> B	<i>Setup</i> C
		$\bar{u}_T$ m/s	$\bar{u}_T$ m/s	$\bar{u}_T$ m/s
$\sigma = 0,250$	E1	0,81	0,91	0,93
	E2	1,00	0,92	0,92
	E3	0,97	0,91	0,92
	E4	0,99	0,95	0,74
$\sigma = 0,123$	E1	0,74	1,01	1,00
	E2	1,41	1,02	1,04
	E3	0,81	1,21	1,14
	E4	1,54	1,26	0,64
$\sigma = 0,072$	E1	0,74	1,13	1,08
	E2	1,39	1,21	1,17
	E3	1,30	1,61	1,28
	E4	1,52	1,88	0,87

As funções densidade de probabilidade, PDF, da velocidade de translação do nariz da bolha alongada,  $u_T$ , são apresentadas na Figura 5.16, onde as linhas representam as estações de medição E1, E2, E3 e E4 e as colunas correspondem aos *setups* A, B e C.

A legenda de cores segue a lógica dos PDFs de fração de vazio: tubo livre (—),  $\sigma = 0,250$  (—),  $\sigma = 0,123$  (—) e  $\sigma = 0,072$  (—). Figuras com fundo cinza representam estações de medição localizadas à montante e figuras com fundo branco correspondem às estações à jusante da placa de orifício. Como estado de referência, a

velocidade de translação do nariz da bolha alongada para escoamento em tubo livre está apresentada em todas as figuras. O pico representa o valor médio de 0,95 m/s.

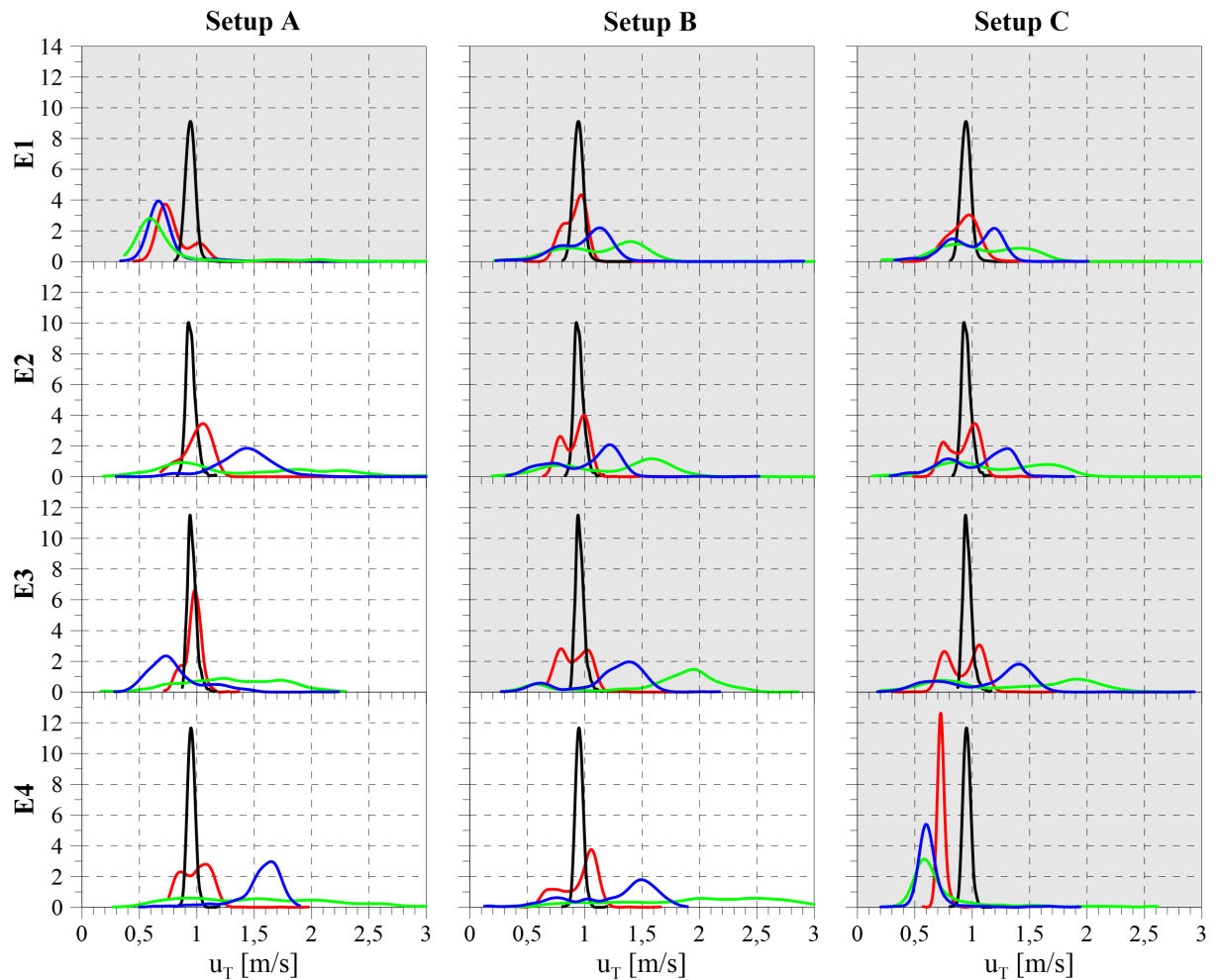


Figura 5.16: Função densidade de probabilidade da velocidade de translação do nariz da bolha alongada nas estações de medição para tubo livre e para  $\sigma = 0,250$ ,  $0,123$  e  $0,072$  nos *setups* A, B e C. Legenda: tubo livre (—),  $\sigma = 0,250$  (—),  $\sigma = 0,123$  (—),  $\sigma = 0,072$  (—).

Inicia-se a análise da Figura 5.16 pelo *setup* A na única estação de medição à montante: E1.  $\sigma = 0,250$  inicia com a presença de duas modas e para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  o comportamento bimodal deixa de existir. À proporção que  $\sigma$  decresce, ocorre um deslocamento para as baixas velocidades.

Ainda no *setup* A porém nas estações à jusante, nota-se um grande espalhamento de  $u_T$  para as três razões de contração de área. Foca-se a análise na estação de medição E4, localizada 701 D à jusante da placa de orifício. Percebe-se que, mesmo distante,  $u_T$  ainda está submetida aos efeitos do orifício, com valores de  $u_T$  variando entre 0,15 m/s e 3,0 m/s para  $\sigma = 0,072$  se comparado com o tubo reto.

Analisa-se o *setup* B na Figura 5.16. As estações de medição à montante da obstrução são E1, E2 e E3. Percebe-se, nas respectivas estações, o comportamento bimodal.

A ocorrência de duas modas nos PDFs de  $u_T$  é a assinatura característica da existência dos ciclos de aceleração e desaceleração na seção de testes. Tais ciclos de aceleração e desaceleração surgem da passagem alternada de bolhas de gás e pistões de líquido através da obstrução.

Durante a passagem do pistão de líquido pela placa de orifício, o escoamento é desacelerado e o nariz da bolha que segue atrás do pistão de líquido tem sua velocidade reduzida. A aceleração acontece na passagem da bolha de gás pela obstrução, fazendo com que as sondas de haste capturem bolhas de gás rápidas ao longo da seção de testes. Toma-se como exemplo a estação de medição E3 no *setup* B na Figura 5.16. As modas à direita representam os ciclos de aceleração do escoamento, as modas à esquerda os ciclos de desaceleração. Nota-se que as modas para  $\sigma = 0,072$  (linha verde) são mais afastadas que as modas de  $\sigma = 0,250$  (linha vermelha). Portanto, conforme a razão de contração de área diminui, os fenômenos de aceleração e desaceleração são intensificados.

Ainda nas estações à montante para *setup* B, foca-se a análise na razão de contração de área mais crítica: 0,072 (linha verde). As modas na estação E1 para baixas e altas velocidades localizam-se, respectivamente, em 0,80 m/s e 1,40 m/s. Na estação E2 as baixas velocidades se mantêm em 0,80 m/s porém para velocidades altas desloca-se para 1,60 m/s. Na estação E3, localizada 81 D à montante da placa de orifício, ocorre o maior distanciamento entre as modas, onde as baixas velocidades encontram-se próximo de 0,60 m/s e altas velocidades próximo de 2,0 m/s. Além da dependência da razão de contração de área, os ciclos de aceleração e desaceleração também são intensificados conforme o escoamento se aproxima da restrição.

Para o *setup* C, na Figura 5.16, todas as estações de medição encontram-se à montante da obstrução. As estações de medição E1, E2 e E3 apresentam grande similaridade com as respectivas estações no *setup* B.

As estações E1 para *setup* A e E4 para *setup* C localizam-se 16 D à montante da respectiva contração. Percebe-se a semelhança no deslocamento das modas para as baixas velocidades, apesar das densidades assumirem valores diferentes. No momento em que uma bolha alongada localiza-se a 16 D do orifício ela segue um pistão de líquido, que no mesmo instante está passando pela obstrução. A desaceleração causada pela passagem do pistão de líquido através da placa de orifício é sentida pela bolha alongada que está logo atrás, fazendo com que o nariz da bolha alongada cruze as sondas de haste localizadas 16 D da obstrução durante o ciclo de desaceleração do escoamento.

## 5.5 Frequência de Passagem de Golfadas

Os valores médios de frequência de passagem de golfadas,  $\bar{f}$ , estão expostos na Tabela 5.12 e ilustrados na Figura 5.17 para escoamento em tubo livre e para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 nos *setups* A, B e C. Mantém-se o mesmo código de símbolos: tubo livre ( $\square$ ),

$\sigma = 0,250$  ( $\diamond$ ),  $\sigma = 0,123$  ( $\circ$ ) e  $\sigma = 0,072$  ( $\triangle$ ). As linhas pretas tracejadas representam a posição axial da placa de orifício nos três *setups*.

Para escoamento em tubo livre, na Tabela 5.12, a frequência média de passagem de golfadas demonstra um decréscimo ao passo que o escoamento avança entre as estações de medição. O decréscimo de  $\bar{f}$  ocorre devido à interação entre as bolhas alongadas vizinhas que leva à coalescência, Talvy, Shemer e Barnea (2000). O maior valor para  $\bar{f}$  no tubo livre é de 0,90 Hz na estação de medição E1 e mínimo de 0,58 Hz na estação de medição E4. A queda nos valores de  $\bar{f}$  entre estações de medição E1-E2, E2-E3 e E3-E4 para escoamento em tubo livre é de 21%, 13% e 5%, respectivamente. Mesmo para escoamento na presença da placa de orifício, a frequência média de passagem de golfadas tende a diminuir conforme o escoamento se aproxima da saída da seção de testes.

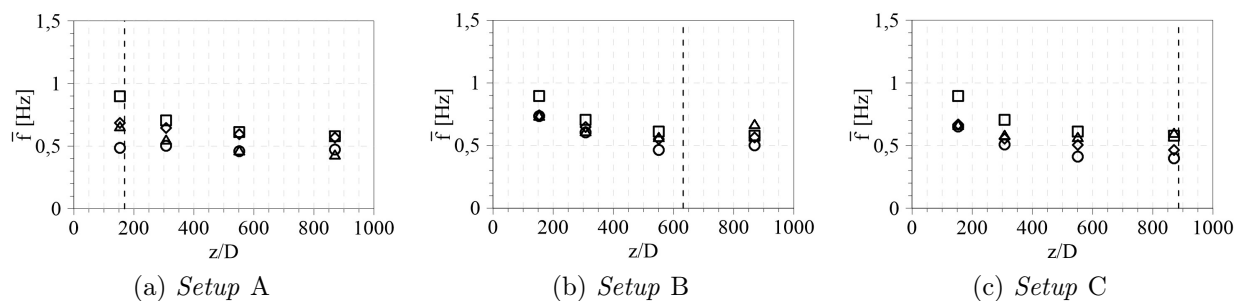


Figura 5.17: Frequência média de passagem de golfadas nas estações de medição E1 até E4 para *setups* A, B e C. Legenda: tubo livre ( $\square$ ),  $\sigma = 0,250$  ( $\diamond$ ),  $\sigma = 0,123$  ( $\circ$ ) e  $\sigma = 0,072$  ( $\triangle$ ).

Inicia-se a análise pelas frequências médias de passagem de golfadas no *setup* A, Figura 5.17a ou Tabela 5.12. Na estação de medição E1, localizada 16 D à montante da obstrução, nota-se um decréscimo nos valores de  $\bar{f}$  em relação ao tubo livre. Após passar pela obstrução, todos os valores de  $\bar{f}$  para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 são iguais ou menores do que tubo livre. Ainda no *setup* A, para uma mesma razão de contração de área, nota-se pouca alteração à montante e à jusante da placa de orifício.

Para o *setup* B, Figura 5.17b, os valores de  $\bar{f}$  nas estações E1, E2 e E3 para  $\sigma = 0,250$ , 0,123 e 0,072 são relativamente menores do que o tubo livre. Na estação de medição E4, após passar pela placa de orifício, os valores médios para escoamento na presença de obstrução registram um leve aumento devido ao novo desenvolvimento ao qual as golfadas foram submetidas. Já para o *setup* C, Figura 5.17c, os valores decrescem até a placa de orifício, com exceção da estação de medição E4. Os valores de  $\bar{f}$  para escoamento em tubo livre demonstraram ser maiores ou iguais aos valores de  $\bar{f}$  para escoamento com orifício, nos três *setups*.

Concluindo: valores de  $\bar{f}$  para escoamento na presença da placa de orifício são, na maioria das vezes, menores ou iguais ao tubo livre, em concordância com Zeghloul et al. (2015).

Tabela 5.12: Frequência média de passagem de golfadas nas estações de medição E1 até E4 para tubo livre e para  $\sigma = 0,250, 0,123$  e  $0,072$  presentes *setups* A, B e C.

	Estação	$\bar{f}$ Hz		
Tubo Livre	E1	0,90		
	E2	0,71		
	E3	0,61		
	E4	0,58		
Razão de Contração de Área	Estação	<i>Setup</i> A	<i>Setup</i> B	<i>Setup</i> C
		$\bar{f}$ Hz	$\bar{f}$ Hz	$\bar{f}$ Hz
$\sigma = 0,250$	E1	0,69	0,74	0,67
	E2	0,65	0,65	0,56
	E3	0,60	0,55	0,51
	E4	0,57	0,56	0,46
$\sigma = 0,123$	E1	0,49	0,73	0,65
	E2	0,50	0,60	0,51
	E3	0,46	0,47	0,41
	E4	0,47	0,50	0,40
$\sigma = 0,072$	E1	0,66	0,74	0,66
	E2	0,55	0,62	0,58
	E3	0,47	0,57	0,57
	E4	0,43	0,68	0,60

## 6. CONCLUSÕES

Investigou-se experimentalmente o escoamento horizontal bifásico de ar e água através de uma placa de orifício, com o intuito de identificar a influência da obstrução nas propriedades do escoamento. Através da instrumentação da seção de testes com transdutores de pressão e sensores de condutância, foi possível avaliar as seguintes propriedades: pressão, fração de vazio, velocidade de translação do nariz da bolha alongada e frequência de passagem de golfadas. Para visualização do escoamento, empregou-se uma câmera de alta velocidade em três diferentes posições, permitindo visualizar fenômenos induzidos pela placa de orifício.

O choque do pistão de líquido com o orifício é responsável por gerar uma onda de pressão no sentido contrário ao escoamento, causando um deslocamento retrógrado nas estruturas à montante da singularidade, de modo que os efeitos são dissipados pelo atrito até retomar o sentido original do escoamento. O efeito retrógrado sentido na bolha de gás gera perturbações no filme de líquido. Tais perturbações, no geral, crescem e tocam a parte superior do tubo ocasionando a quebra da respectiva bolha, dando origem à um novo pistão de líquido.

A passagem do pistão de líquido pela placa de orifício, além de gerar um pulso de pressão, também desacelera o escoamento à montante. A desaceleração tende a acumular a fase incompressível dentro da seção de testes, comprimindo a bolha de gás na parte superior da tubulação. Quando a bolha de gás atinge a obstrução, o escoamento é acelerado, o filme de líquido diminui e a bolha de gás sofre uma redução em seu comprimento.

Na placa de orifício, percebeu-se a geração de um jato de líquido durante a passagem do pistão de líquido, independente da razão de contração de área. Durante a passagem da bolha de gás através da obstrução o escoamento se comporta de duas formas: para  $\sigma = 0,250$  detecta-se o regime estratificado onde o líquido flui pela parte inferior da obstrução e o gás pela superior. Já para  $\sigma = 0,123$  e  $0,072$  obteve-se um jato bifásico. Logo à jusante da obstrução, observou-se uma intensa mistura entre as fases, gerando uma recirculação dos fluidos de testes. Um novo escoamento é desenvolvido à jusante da singularidade e pistões de líquido aerados são originados.

A pressão absoluta nas estações de medição mostrou-se dependente da razão de contração de área, de forma que quanto menor a obstrução, maior é o aumento na pressão. Após a placa de orifício, as pressões absolutas nas estações de medição tendem aos valores do escoamento em tubo livre. O gradiente de pressão mostrou-se linear e independente da razão de contração de área.

A pressão diferencial instantânea na placa de orifício apresentou comportamento pulsátil devido à passagem alternada de pistões de líquido e bolhas de gás através da obstrução. Atribui-se o aumento na pressão diferencial à passagem do pistão de líquido e a queda à passagem da bolha de gás. A proximidade do orifício em relação ao injetor



gás-líquido impede a interação entre as estruturas do escoamento, gerando flutuações com periodicidades definidas no sinal de pressão diferencial. Conforme a distância entre o injetor e o orifício aumenta, as estruturas interagem e flutuações com diferentes frequências surgem. O espectro de frequências do sinal de pressão está entre 0,10 Hz e 0,90 Hz. Os valores médios de pressão diferencial e amplitudes não dependem da distância entre o injetor gás-líquido e a placa de orifício.

O pulso de pressão originado pelo choque do pistão de líquido com a placa de orifício propaga-se na seção de testes. Mesmo para  $\sigma = 0,250$  próximo da saída da seção de testes, foi possível detectar a reflexão do pulso de pressão na primeira estação de medição. O sinal de pressão das estações à montante da obstrução estão em fase com o sinal da pressão diferencial da placa de orifício. O sinal de pressão à jusante apresenta-se defasado em  $\pi$  radianos.

A defasagem é explicada por uma queda na taxa de transferência de volume através do orifício. O pistão de líquido escoar mais lentamente pelo orifício do que a bolha de gás, diminuindo a injeção de fluidos na seção à jusante da obstrução, conseqüentemente gerando a queda na pressão à jusante. O oposto ocorre para a passagem da bolha de gás. Portanto, a placa de orifício regula a pressão na seção de testes tanto à montante quanto à jusante.

O sinal instantâneo de fração de vazio apresentou dependência da razão de contração de área. A presença da placa de orifício, mesmo distante do injetor gás-líquido, afeta a formação do escoamento perturbando o sinal instantâneo de fração de vazio.

Conforme a razão de contração de área decresce, ocorre um espalhamento da fração de vazio. À montante da placa de orifício, em distâncias menores ou iguais a 16 D, as PDFs deslocam-se para baixos valores de fração de vazio, independentemente da posição da obstrução na seção de testes. À jusante da obstrução, a fração de vazio apresentou dependência da razão de contração de área, conforme o escoamento se desenvolve novamente.

As PDFs da velocidade de translação do nariz da bolha alongada apresentaram comportamento bimodal, comprovando a existência dos ciclos de aceleração e desaceleração induzidos pela passagem alternada do escoamento através da obstrução. À medida que a razão de contração de área diminui e o escoamento se aproxima da obstrução, os efeitos se intensificam.

Os valores médios de frequência de passagem de golfadas apresentaram similaridade entre as seções montante e jusante da placa de orifício e no geral são iguais ou menores que do escoamento em tubo livre.

Para trabalhos futuros sugere-se realizar experimentos com diferentes velocidades superficiais e padrões de escoamento, testar escoamento vertical e inclinado, coletar dados de fração de vazio e escorregamento próximo da placa de orifício, à montante e à jusante, inserir o comportamento pulsátil da pressão nos modelos unidimensionais de vazão e trocar

os fluidos de testes, permitindo estudar mudança de fase na obstrução.

## REFERÊNCIAS

- BERTOLA, V. Optical probe visualization of air–water flow structure through a sudden area contraction. **Experiments in fluids**, Springer, v. 32, n. 4, p. 481–486, 2002.
- BERTOLA, V.; MOSCHELLA, F. Slug velocity and liquid layer thickness before an abrupt contraction in horizontal gas-liquid flow. **Experiments in fluids**, Springer, v. 34, n. 1, p. 150–153, 2003.
- CHISHOLM, D. Two-phase flow in pipelines and heat exchangers. G. Godwin in association with Institution of Chemical Engineers, p. 167–186, 1983.
- Dalla Maria, L. Estudo experimental das ondas de fração de vazio e pressão em escoamento horizontal transiente de ar e água no padrão intermitente. Campinas, SP, 2016.
- DUARTE, M. Influência da viscosidade sobre o escoamento gás-líquido horizontal intermitente. Campinas, SP, 2007.
- FOSSA, M.; GUGLIELMINI, G. Pressure drop and void fraction profiles during horizontal flow through thin and thick orifices. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Elsevier, v. 26, n. 5, p. 513–523, 2002.
- FOSSA, M.; GUGLIELMINI, G.; MARCHITTO, A. Two-phase flow structure close to orifice contractions during horizontal intermittent flows. **International communications in heat and mass transfer**, Elsevier, v. 33, n. 6, p. 698–708, 2006.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. Introdução à mecânica dos fluidos. Grupo Gen-LTC, 2000.
- ISO 5167-2:2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross section conduits running full—part 2: Orifice plates. 2003.
- JAMES, R. Metering of steam-water two-phase flow by sharp-edged orifices. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 180, n. 1, p. 549–572, 1965.
- KOJASOY, G. et al. Two-phase pressure drop in multiple thick-and thin-orifice plates. **Experimental thermal and fluid science**, Elsevier, v. 15, n. 4, p. 347–358, 1997.
- LIN, Z. Two-phase flow measurements with sharp-edged orifices. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 8, n. 6, p. 683–693, 1982.

LOCKHART, R.; MARTINELLI, R. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. **Chem. Eng. Prog**, v. 45, n. 1, p. 39–48, 1949.

MORRIS, S. Two phase pressure drop across valves and orifice plates. In: **Proceedings of the European Two Phase Flow Group Meeting, Marchwood Engineering Laboratories, Southampton, UK**. [S.l.: s.n.], 1985.

MURDOCK, J. Two-phase flow measurement with orifices orifices. **Journal of Basic Engineering**, p. 419–432, 1962.

NETTO, J. F.; FABRE, J.; PERESSON, L. Shape of long bubbles in horizontal slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 25, n. 6, p. 1129–1160, 1999.

OLIVEIRA, J. L. G. et al. Mass flow rate measurements in gas–liquid flows by means of a venturi or orifice plate coupled to a void fraction sensor. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Elsevier, v. 33, n. 2, p. 253–260, 2009.

OWEN, I.; HUSSEIN, I. The propulsion of an isolated slug through a pipe and the forces produced as it impacts upon an orifice plate. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 20, n. 3, p. 659–666, 1994.

ROSA, E. S.; SOUZA, M. A. Spatial void fraction measurement in an upward gas–liquid flow on the slug regime. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier, v. 46, p. 139–154, 2015.

SALCUDEAN, M.; CHUN, J.; GROENEVELD, D. Effect of flow obstruction on void distribution in horizontal air-water flow. **International journal of multiphase flow**, Pergamon, v. 9, n. 1, p. 91–96, 1983.

SALCUDEAN, M.; GROENEVELD, D. C.; LEUNG, L. Effect of flow-obstruction geometry on pressure drops in horizontal air-water flow. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 9, n. 1, p. 73–85, 1983.

SHOHAM, O. Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers, 2006.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. Two-phase slug flow. **Advances in heat transfer**, Elsevier, v. 20, p. 83–132, 1990.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, Wiley Online Library, v. 22, n. 1, p. 47–55, 1976.

TALVY, C. A.; SHEMER, L.; BARNEA, D. On the interaction between two consecutive elongated bubbles in a vertical pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 26, n. 12, p. 1905–1923, 2000.

TAPUCU, A. et al. Pressure losses caused by area changes in a single-channel flow under two-phase flow conditions. **International journal of multiphase flow**, Elsevier, v. 15, n. 1, p. 51–64, 1989.

ZEGHLOUL, A. et al. Interrogating the effect of an orifice on the upward two-phase gas–liquid flow behavior. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier, v. 74, p. 96–105, 2015.

## A. Apêndice A - Análise de Incertezas

### A.1 Incerteza da Pressão

Um manômetro de mercúrio foi utilizado para calibrar os transdutores de pressão localizados nas estações de testes e na placa de orifício. A resolução do manômetro é de 1 mmHg, resultando em uma incerteza absoluta nos dados de pressão de  $\pm 0,10$  kPa.

### A.2 Incerteza da Fração de Vazio

O nivelamento à laser da seção de testes resulta em uma precisão de 1 mm no alinhamento. Calcula-se a variação na fração de vazio ocasionada pela precisão de 1 mm para diferentes níveis de líquido dentro da tubulação. Os níveis de líquido selecionados para o cálculo são de 5 mm, 7 mm, 9 mm, 11 mm e 13 mm, onde 13 mm é o meio do tubo que corresponde à uma fração de vazio de 0,50.

Soma-se as variações causadas na fração de vazio para os respectivos níveis de líquido, obtendo uma incerteza absoluta de  $\pm 0,20$ . Considera-se portanto 2 desvios para garantir o intervalo de 95% de confiança.

Substitui-se na Equação A.1, onde  $N$  é o número de amostras para uma única aquisição de 120 segundos. Como a frequência de amostragem é 3 kHz, o número de amostras é de 360.000.

$$\delta\alpha = \frac{\sigma_P}{\sqrt{N}} = \frac{2 \times 0,20}{\sqrt{360.000}} = 6,66 \times 10^{-4}. \quad (\text{A.1})$$

Após, calcula-se a incerteza relativa (Equação A.2), onde  $\bar{\alpha}$  corresponde ao valor médio da fração de vazio na estação de medição E1 para  $\sigma = 0,072$  no *setup* C. Extrapolase a incerteza para os outros experimentos. Obtém-se, portanto, uma incerteza relativa de 0,17% para a fração de vazio.

$$\varepsilon\alpha = \frac{\delta\alpha}{\bar{\alpha}} = \frac{6,66 \times 10^{-4}}{0,40} = 0,17\%. \quad (\text{A.2})$$

### A.3 Incerteza da Velocidade de Translação do Nariz da Bolha Alongada

A velocidade de translação do nariz da bolha,  $u_T$ , é definida pela razão entre o espaçamento das sondas de haste e o tempo necessário para o nariz transladar entre a haste à montante até a haste à jusante de uma determinada estação, veja Equação 3.3. A incerteza relativa de  $u_T$  é apresentada na Equação A.3:

$$\varepsilon u_T = \sqrt{\left(\frac{\delta S_p}{S_p}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta t}{\Delta T B_j}\right)^2 + (\varepsilon \overline{J_L})^2 + (\varepsilon \overline{J_G})^2 + (\varepsilon F C_{\overline{u_T}})^2}. \quad (\text{A.3})$$

O primeiro termo apresenta a incerteza relativa à medição do espaçamento entre as duas sondas de haste de determinada estação de medição. O segundo termo trata da incerteza relativa do intervalo de tempo necessário para o nariz da bolha transladar entre as sondas de haste à montante e à jusante. O terceiro e o quarto termo correspondem à incerteza relativa das flutuações nas velocidades superficiais de líquido e de gás. Por fim, o quinto termo representa a incerteza relativa de  $u_T$  ocasionada pela aplicação do fator de corte no processamento dos dados.

A estimativa da incerteza relativa ao fator de corte é analisada para o pior dos casos: *setup* C e  $\sigma = 0,072$ . Os fatores de corte utilizados para a determinação da velocidade de translação do nariz da bolha alongada estão entre 0,6 e 0,8.

A distância entre as sondas de haste,  $S_p$ , de uma respectiva estação de medição é determinada com uma precisão de 0,01 mm. Uma vez que  $S_p = 112,5$  mm,  $\delta S_p/S_p \rightarrow 0$ . Portanto, considera-se desprezível o primeiro termo da Equação A.3.

Isolando  $\Delta T B_j$  na Equação 3.3, obtém-se a Equação A.4, que apresenta o tempo necessário para o nariz da bolha da  $j$ -ésima unidade transladar entre as sondas de haste montante e jusante de uma determinada estação:

$$\Delta T B_j = \frac{S_p}{u_{Tj}}. \quad (\text{A.4})$$

A incerteza absoluta na medição do tempo é dada pela razão entre 2 pontos de uma aquisição e a frequência de amostragem,  $f_{aq}$ , apresentada na Equação A.5:

$$\delta \Delta t = \frac{2}{f_{aq}}. \quad (\text{A.5})$$

Substitui-se o termo relativo à incerteza do intervalo de tempo na Equação A.3 pelo termo apresentado na Equação A.6:

$$\frac{\delta \Delta t}{\Delta T B_j} = \frac{2}{f_{aq}} \frac{u_{Tj}}{S_p}. \quad (\text{A.6})$$

Anulando o termo referente à incerteza no espaçamento entre as sondas de haste, obtém-se a Equação A.7:



$$\varepsilon u_T = \sqrt{\left(\frac{2}{f_{aq}} \frac{u_{Tj}}{S_p}\right)^2 + (\varepsilon \overline{J_L})^2 + (\varepsilon \overline{J_G})^2 + (\varepsilon FC_{u_T})^2}. \quad (\text{A.7})$$

A incerteza relativa na medição do tempo é de 0,7%. As incertezas relativas às velocidades superficiais de líquido e de gás correspondem à duas vezes o desvio padrão dos valores obtidos para  $J_L$  e  $J_G$ , resultando em 1,4% e 0,3%, respectivamente. A incerteza relativa atribuída ao fator de corte é de 0,8%, resultando em uma incerteza relativa para  $u_T$  de 1,8%, conforme Equação A.8.

$$\varepsilon u_T = \sqrt{0,007^2 + 0,014^2 + 0,003^2 + 0,008^2} = 1,8\%. \quad (\text{A.8})$$

#### A.4 Incerteza da Frequência de Passagem de Golfadas

A incerteza na frequência de passagem de golfadas está expressa na Equação A.9:

$$\varepsilon f = \sqrt{(\varepsilon t_u)^2 + (\varepsilon FC_{\overline{f}})^2}. \quad (\text{A.9})$$

onde o primeiro termo do lado direito da equação é a incerteza relativa ao tempo em que a célula unitária (bolha+pistão) ficou em contato com determinada sonda de haste e o segundo termo é a incerteza relativa à aplicação do fator de corte para o processamento dos dados.

A estimativa da incerteza relativa ao fator de corte é analisada para o pior dos casos: *setup* C e  $\sigma = 0,072$ . Os fatores de corte utilizados para a determinação da frequência de passagem de golfadas estão entre 0,6 e 0,8. Considerando que a frequência de aquisição é de 3000 Hz, despreza-se o primeiro termo do lado direito, atribuindo a incerteza na frequência de passagem de golfadas somente ao fator de corte, resultando em 5%.

$$\varepsilon f = \sqrt{0,05^2} = 5\%. \quad (\text{A.10})$$