



COPPE/UFRJ

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM TUBO
CIRCULAR INCLINADO USANDO TÉCNICAS ULTRASÔNICAS E DE
VISUALIZAÇÃO

Jurandy de Souza Cunha Filho

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientador: Su Jian

Rio de Janeiro

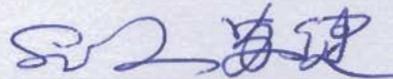
Maio de 2010

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM TUBO CIRCULAR
INCLINADO USANDO TÉCNICAS ULTRASÔNICAS E DE VISUALIZAÇÃO

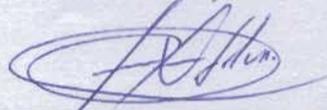
Jurandyr de Souza Cunha Filho

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

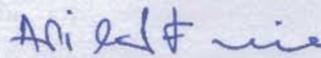
Examinada por:



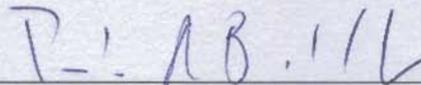
Prof. Su Jian, D.Sc.



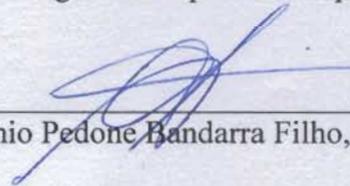
Prof. Ademir Xavier da Silva, D.Sc.



Prof. Átila Pantaleão Silva Freire, Ph.D



Prof. Paulo Augusto Berquó de Sampaio, Ph.D.



Prof. Enio Pedone Bandarra Filho, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2010

Cunha Filho, Jurandyr de Souza

Estudo Experimental de Escoamento Bifásico em Tubo Circular Inclinado Usando Técnicas Ultrasônicas e de Visualização /Jurandyr de Souza Cunha Filho.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2010.

XXXVIII, 260 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Su Jian

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2010.

Referencias Bibliográficas: p. 200-209.

1. Ultra-Som. 2. Escoamento Bifásico Horizontal e Inclinado. 3. Bolhas Alongadas. I. Su, Jian II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

Dedico este trabalho a Rosana, minha esposa,
a Iasmin, Vinícius e Beatriz, meus filhos e
a Jurandyr e Lúcia, meus pais.

AGRADECIMENTOS

- A Deus por mais esta etapa.
- Aos professores e funcionários do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE, particularmente ao Prof. Su Jian, pelo apoio e dedicação na orientação.
- Aos funcionários do Instituto de Engenharia Nuclear, em especial ao Dr Carlos Alfredo Lamy e ao Dr José Luiz Horácio Faccini.
- Aos colegas de curso, pelo espírito de coletividade.
- Aos alunos de iniciação científica Livia Alves Oliveira e Leonardo Reis.
- Em fim, a todos que de uma forma ou de outra contribuíram com este trabalho.

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

ESTUDO EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM TUBO CIRCULAR INCLINADO USANDO TÉCNICAS ULTRASÔNICAS E DE VISUALIZAÇÃO

Jurandyr de Souza Cunha Filho

Maio/2010

Orientador: Su Jian

Programa: Engenharia Nuclear

Medidas de parâmetros interfaciais em escoamentos bifásicos gás-líquido são de grande importância para as engenharias nuclear, mecânica, química e de petróleo. O objetivo do presente trabalho é estudar experimentalmente escoamento bifásico gás-líquido em regimes intermitentes em tubo circular horizontal e ligeiramente inclinado, usando técnicas ultrasônicas e de visualização. Foram obtidas medidas experimentais das velocidades e comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido, bem como do perfil longitudinal da cauda da bolha alongada para os ângulos de inclinação -5° , $-2,5^\circ$, 0° , 5° e 10° referentes a horizontal. As faixas de velocidades superficiais do líquido e do gás variam respectivamente de 0,22 a 1,08 m/s e de 0,76 a 2,07 m/s para escoamentos ascendentes, e de 0,81 a 1,62 m/s e de 0,74 a 2,02 m/s para escoamentos descendentes e horizontal. Para cada ângulo foram estudados nove combinações de velocidades superficiais do líquido e do gás. Os resultados obtidos pelas técnicas ultrasônica de alta velocidade e por visualização apresentaram boa concordância. Verificou-se que a velocidade do nariz da bolha alongada diminui com o aumento do ângulo de inclinação do escoamento referente a horizontal de -5° a 10° . Observaram-se relações lineares entre as velocidades e comprimento das bolhas alongadas em relação às velocidades superficiais do gás e do líquido para determinados ângulos de escoamento. Verificou-se que correlações da literatura sobreestimam os valores da velocidade do nariz da bolha alongada.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

HIGH SPEED ULTRASONIC TECHNIQUE TO MEASURE TWO PHASE AIR-
WATER INTERMITTENT FLOW IN HORIZONTAL AND INCLINED PIPELINE

Jurandyr de Souza Cunha Filho

May/2010

Advisor: Su Jian

Department: Nuclear Engineering

The measurement of interfacial parameters of two-phase gas-liquid flow are of great importance to nuclear, mechanical, chemical, and petroleum engineering. The objective of this work is to study experimentally two-phase gas-liquid flow in intermittent flow regimes in a horizontal and slight-inclined circular tube, using ultrasonic and visualization techniques. Velocities and lengths of elongated gas bubbles and liquid slugs, as well as the longitudinal shape of elongated bubble tail are measured experimentally for the inclined angles of -5° , $-2,5^\circ$, 0° , 5° e 10° with respect to the horizontal. The ranges of the superficial velocity of liquids and gas are respectively from 0.22 to 1.08 m/s and from 0.76 to 2.07 m/s for upward flow and from 0.81 to 1.62 m/s and from 0.74 to 2.02 m/s for downward and horizontal flow. For each inclination pipe nine combinations of superficial gas and liquid velocities were studied. The results obtained by the high speed ultrasonic technique and the visualization technique are in good agreement. It was found that the bubble nose velocity decreases with increasing inclination angle from -5° to 10° with respect to the horizontal. Linear relation between velocities and lengths of elongated bubbles in relation to the gas and liquid superficial velocities was observed for some inclination angles. The experimental results indicated that available correlations in the literature overestimated the elongated bubble nose velocity.

Sumário

Dedicatória	v
Agradecimento	vi
Resumo	vii
Abstract	vii
Índice de Figuras	xiii
Índice de Tabelas	xxi
Lista de Símbolos	xxv
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Organização do Trabalho	3
2 Fundamentos e Revisão Bibliográfica	5
2.1 Princípios da Propagação das Ondas Ultra-Sônicas	5
2.1.1 Propagação das Ondas Ultra-Sônicas	7
2.1.2 Comprimento e Número de Onda	10
2.1.3 Geração de Ondas Ultra-Sônicas	11
2.1.4 Grandezas e Fenômenos Físicos Relativos a Propagação das Ondas Acústicas	15
2.2 Fundamentos de Escoamentos Bifásicos	25
2.2.1 Fração das Fases	25

2.2.2	Fração Volumétrica ou Fração de Descarga	27
2.2.3	Velocidade Superficial da Fase	27
2.2.4	Velocidade da Mistura	27
2.2.5	Velocidade da Fase	27
2.2.6	Razão de Deslizamento ou Escorregamento	28
2.2.7	Velocidade Relativa	28
2.2.8	Velocidade de Arraste	28
2.2.9	Equações da Conservação em um Escoamento Bifásico Unidimensional	30
2.2.10	Número de Froude	32
2.2.11	Padrões de Escoamento	33
2.3	Estudos Sobre o Padrão de Escoamento Intermitente	52
2.4	Comprimento da Célula Unitária no Escoamento Intermitente Horizontal	66
2.5	Escoamento Bifásico em Tubulação Inclinada	68
2.6	Velocidade Translacional de Bolhas Alongadas	80
2.7	Técnicas de Medição em Escoamentos Bifásicos	82
2.7.1	TÉCNICAS INVASIVAS	82
2.7.2	Técnicas Invasivas Indiretas	84
2.7.3	Técnicas Não Invasivas	85
2.8	Aplicação das Técnicas Ultra-sônicas em Escoamentos Bifásicos	89

3 Investigação Experimental da Interação do Campo Ultra-Sônico com Esferas de Aço Imersas em Água **92**

3.1	Aparato Experimental	92
3.2	Ecogramas	96
3.3	Fenômenos Observados	96
3.4	Resultados e Discussão	103
3.4.1	Processamento de Sinal	103
3.4.2	Conclusões	104

4	Planta da Seção de Testes para os Padrões de Escoamento Bifásico	
	Horizontal e Inclinado	107
4.1	Descrição Geral da Planta para Testes Bifásico Horizontal e Inclinado	107
4.2	Funcionamento da Planta de Seção de Testes	117
4.3	Partida da planta de teste e condições de operação	120
4.3.1	Matriz dos pontos estudados	121
5	Procedimentos Experimentais	123
5.1	Técnica Ultra-sônica	123
5.1.1	Velocidades das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido . .	123
5.1.2	Comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido	127
5.1.3	Perfis da bolha alongada	128
5.2	Técnica por Visualização	130
5.3	Análise de Incertezas	131
5.4	Comparação das Técnicas	132
6	Resultados e Discussões	133
6.1	Escoamento Horizontal $\beta=0^\circ$	134
6.1.1	Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média da Bolha	134
6.1.2	Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Fron- tal, Posterior e Média.	144
6.1.3	Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.	145
6.2	Escoamento Inclinado, $\beta=5^\circ$	148
6.2.1	Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média.	149
6.2.2	Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Fron- tal, Posterior e Média.	156
6.2.3	Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.	156
6.3	Escoamento Inclinado, $\beta=10^\circ$	159

6.3.1	Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média.	160
6.3.2	Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Frontal, Posterior e Média.	164
6.3.3	Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.	164
6.4	Escoamento Inclinado, $\beta = -2,5^\circ$	167
6.4.1	Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média.	167
6.4.2	Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Frontal, Posterior e Média.	171
6.4.3	Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.	171
6.5	Escoamento Inclinado, $\beta = -5^\circ$	174
6.5.1	Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média.	175
6.5.2	Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Frontal, Posterior e Média.	179
6.5.3	Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.	179
6.6	Variação das Velocidades do Nariz e Comprimentos da Bolha Alongada em Relação a Inclinação do Escoamento	182
6.6.1	Variação das Velocidades do Nariz Bolha Alongada	182
6.6.2	Variação do Comprimento da Bolha Alongada	187
6.7	Perfil da Bolha	189
7	Conclusões e Sugestões	195
7.1	Conclusões	195
7.2	Sugestões para Trabalhos Futuros	198
	Referências Bibliográficas	200

Apendice I - Calibração Estática por Comparação do Sistema Ultra-sônico	210
Apendice II - Resultados da Interação do Campo Ultra-Sônico com a Esfera de Diâmetro 3/16" e Campos Mortos Gerados	210
Apendice III - Fabricação e Montagem da Seção de Testes	227
Apendice IV - Tabelas de Resultados	233

Lista de Figuras

2.1	Força elástica.	6
2.2	Força Externa	6
2.3	Direções de propagação das ondas acústicas e de suas respectivas partículas	9
2.4	Transdutor.	13
2.5	Campos ultra-sônicos.	14
2.6	Difração da onda.	17
2.7	Reflexão e transmissão da onda acústica.	21
2.8	Lei de Snell.	22
2.9	Reversão de fase.	24
2.10	Transmissão da onda.	25
2.11	Escoamento bifásico em um tubo.	31
2.12	Padrões de escoamento horizontal- 1) Em bolhas, 2) Pistonado, 3) Estratificado lico 4) Estratificado ondulado 5) Slug 6) Anular.	35
2.13	Mapa de Baker (1954).	37
2.14	Mapa de Beggs e Brill (1973).	38
2.15	Mapa de Mandhane et al. (1974).	42
2.16	Escoamento estratificado em equilíbrio.	46
2.17	Mapa do padrão de escoamento bifásico óleo-gás descendente de -5° segundo Oliemans e Pots (2006).	50
2.18	Mapa do padrão de escoamento bifásico ar-água ascendente de 10° segundo Petalas e Aziz (1998).	51
2.19	Escoamento estratificado - alturas das linhas neutras.	53
2.20	Instabilidade de uma onda.	55

2.21	Crescimento do pistão de líquido segundo Bendiksen e Espedal (1992).	58
2.22	Perfil da bolha alongada segundo Fagundes et al. (1999)(A) $Fr < 1$ - Pistonado (B) $Fr > 2$ - Slug.	62
2.23	Variação da velocidade normalizada versus parâmetro da tensão superficial para 0° , 45° e 90° , segundo Zukoski (1966).	69
3.1	Dispositivo de posicionamento das esferas.	93
3.2	Pontos de referência.	94
3.3	Ecogramas típicos: (a) frequência $5MHz$ e esfera $\phi 3/16''$; (b) frequência $10MHz$ e esfera $\phi 5/16''$	95
3.4	Múltiplas reflexões do eco de fundo - frequência $5MHz$ e intervalo de tempo de $1\mu s$	97
3.5	Múltiplas reflexões do eco de fundo - frequência $5MHz$ e intervalo de tempo de $2\mu s$	98
3.6	Múltiplas reflexões na parede - “ <i>Reverberação</i> ”	99
3.7	Ecograma com ocorrência de ruídos - frequência $5MHz$	100
3.8	Ecograma com redução da amplitude dos ruídos após utilização de vaselina - frequência $5MHz$	100
3.9	Local de aplicação da vaselina.	101
3.10	Ecograma tubo com graxa - frequência $5MHz$	101
3.11	Local de aplicação da graxa.	102
3.12	Gráfico típico com valores absolutos das amplitudes da reflexão da esfera de diâmetro $3/16''$	104
3.13	Gráfico típico com valores absolutos das amplitudes do eco de fundo utilizando-se a esfera de diâmetro $3/16''$	105
4.1	Diagrama da planta da seção de testes	108
4.2	Desenho da planta da seção de testes	109
4.3	Detalhe da seção inclinada apoiada sobre o cavalete	110
4.4	Sala de controle	114
4.5	Componentes do sistema de alimentação de ar comprimido	116
4.6	Diagrama do circuito de água.	118

4.7	Planta do circuito de água.	119
5.1	Posicionamento dos transdutores ultra-sônicos	124
5.2	Ecograma típico registrado pelo sistema ultra-sônico de alta velocidade	125
5.3	Tempos de propagação da onda ultra-sônica Δt_Y na fase líquida da mistura bifásica obtidas pelos transdutores 3 (vermelho) e 4(azul) . .	126
5.4	Perfil da bolha alongada	129
5.5	Deslocamento da interface da cauda da bolha alongada	130
6.1	Mapa do padrão de escoamento horizontal proposto por Mandhane et al. (1974) com os pontos estudados e os observados pela técnica por visualização.	135
6.2	Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra- sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento horizontal.	139
6.3	Velocidades médias da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra- sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento horizontal.	140
6.4	Velocidades médias da cauda da bolha alongada obtidas pelas técni- cas ultra-sônica em função das velocidades médias do nariz da bolha alongada - Escoamento horizontal.	141
6.5	Comparação das técnicas ultra-sônica e de visualização com as corre- lações de Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984) para as veloci- dades médias do nariz da bolha alongada - Escoamento horizontal. . . .	144
6.6	Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento horizontal.	147
6.7	Comprimentos médios dos pistões de líquido obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás.	147
6.8	Pontos estudados e padrões de escoamento observados pela técnica por visualização - Escoamento $+5^\circ$	148

6.9	Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $+5^\circ$	151
6.10	Velocidades médias da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $+5^\circ$	153
6.11	Velocidades médias da cauda da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica em função das velocidades médias do nariz da bolha alongada - Escoamento $+5^\circ$	154
6.12	Velocidades do nariz da bolha obtidas pela técnica ultra-sônica e pela correlação de Bendiksen (1984) - Escoamento $+5^\circ$	154
6.13	Comprimentos médios das bolhas alongadas medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $+5^\circ$	157
6.14	Comprimentos médios dos pistões de líquido medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás.	158
6.15	Pontos estudados e padrões de escoamento observados pela técnica por visualização.	159
6.16	Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - $\beta = +10^\circ$	162
6.17	Velocidades médias da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - $\beta = +10^\circ$	163
6.18	Velocidades médias da cauda da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica em função das velocidades do nariz da bolha alongada - $\beta = +10^\circ$	163
6.19	Comprimentos médios das bolhas alongadas medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $+10^\circ$	166

6.20	Comprimentos médios dos pistões de líquido medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $+10^\circ$	166
6.21	Pontos estudados e padrões de escoamento observados pela técnica por visualização.	168
6.22	Velocidades médias do nariz da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$	169
6.23	Velocidades médias da média da velocidade da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$	169
6.24	Velocidades médias do nariz e da cauda da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$	170
6.25	Velocidades médias do nariz da bolha alongada medidas pela técnicas ultra-sônica e obtidas pela correlação de Bendiksen (1984) em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $-2,5^\circ$	171
6.26	Comprimentos médios das bolhas alongadas medido pela técnica ultra-sônica em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $-2,5^\circ$	173
6.27	Comprimentos médios dos pistões de líquido medido pela técnica ultra-sônica em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $-2,5^\circ$	173
6.28	Pontos estudados e padrões de escoamento observados pela técnica por visualização - Escoamento -5°	175
6.29	Velocidades médias do nariz da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5°	176
6.30	Velocidades médias da média da velocidade da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5°	177
6.31	Velocidades médias da cauda da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica em função das velocidades do nariz da bolha alongada - $\beta = -5^\circ$	178

6.32	Velocidades médias do nariz da bolha alongada medidas pela técnicas ultra-sônica e obtidas pela correlação de Bendksen et al-1984 em função da velocidade superficial do gás - $\beta = 5^\circ$	179
6.33	Comprimentos médios das bolhas alongadas medido pela técnica ultra-sônica em função da velocidade superficial do gás - Escoamento -5°	180
6.34	Comprimentos médios dos pistões de líquido medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento -5°	182
6.35	Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás obtidas pela técnica ultra-sônica.	183
6.36	Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás obtidas pela técnica de visualização.	183
6.37	Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal e ascendente ($+5^\circ$ e $+10^\circ$) obtidas pela técnica de ultra-som.	184
6.38	Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal e ascendente ($+5^\circ$ e $+10^\circ$) obtidas pela técnica de visualização.	185
6.39	Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal, ascendente ($+5^\circ$ e $+10^\circ$) e descendente ($-2,5^\circ$ e -5°) obtidas pela técnica ultra-sônica.	186
6.40	Velocidades do nariz da bolha em função do ângulo de inclinação, obtidas pela técnica ultra-sônica.	186
6.41	Comprimentos da bolha alongada em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal, ascendente ($+5^\circ$ e $+10^\circ$) e descendente ($-2,5^\circ$ e -5°) obtidas pela técnica ultra-sônica.	187
6.42	Comprimentos da bolha alongada em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal, ascendente de $+5^\circ$ e $+10^\circ$ e descendente de -5° obtidas pela técnica ultra-sônica.	188

6.43	Imagens dos perfis das caudas das bolhas alongadas obtidas pela técnicas de visualização e ultra-sônica - Escoamento horizontal.	190
6.44	Imagens dos perfis das caudas das bolhas alongadas obtidas pela técnicas de visualização e ultra-sônica - Escoamento de $+5^\circ$	192
6.45	Imagens dos perfis das caudas das bolhas alongadas obtidas pela técnicas de visualização e ultra-sônica - Escoamento de $+10^\circ$	194
1	(a) Reflexão da esfera - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$; (b) Eco de fundo - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$	214
2	Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através da unidade de área - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$	215
3	Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através do pico a pico - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$	216
4	Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através da área sob a curva - frequência $10MHz$, esfera $\phi 3/16''$	217
5	Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através do pico a pico - frequência $10MHz$, esfera $\phi 3/16''$	218
6	Amplitude do eco de fundo utilizando-se os processamentos de sinais através do pico a pico e da unidade sob área - frequência $10MHz$, esfera $\phi 3/16''$	219
7	Amplitude do eco de fundo utilizando-se os processamentos de sinais através do pico a pico e da unidade sob área - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$	220
8	(a) Reflexão da esfera - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$; (b) Eco de fundo - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$	222

9	Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através da unidade de área - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$	223
10	Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através do pico a pico - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$	224
11	Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através da unidade de área - frequência $10MHz$, esfera $\phi 3/16''$	225
12	Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através do pico a pico - frequência $10MHz$, esfera $\phi 3/16''$	226
13	(a) Campo morto - Esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada a $13,7mm$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de $10MHz$; (b) Campo morto - Esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada a $11,9mm$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de $10MHz$	228
14	(a) Campo morto - Esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada a $13,7mm$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de $5MHz$; (b) Campo morto - Esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada a $11,9mm$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de $10MHz$	229
15	Detalhe de componentes da seção de testes posicionada no chão.	231
16	Detalhe da pré-montagem de parte da seção de testes localizada a frente do circuito de água.	232
17	Seção de testes inclinada de $1''$ montada ao lado da seção horizontal de $2''$	233
18	Tubo de acrílico e outros componentes da seção inclinada.	234
19	Medidor de inclinação com a seção de testes inclinada a $+5^\circ$	234
20	Câmera digital fixa na ponta do suporte.	235
21	Transdutores ultra-sônicos instalados no tubo de acrílico.	235

Lista de Tabelas

2.1	Valores das velocidades de propagação das ondas acústicas.	10
2.2	Impedâncias Acústicas.	16
2.3	Coefficientes de reflexão e transmissão.	26
2.4	Constantes relativas ao padrão de escoamento.	40
2.5	Constantes relativas ao fator C_{BB}	41
2.6	Valores das constantes para cálculo dos fatores de atrito.	47
2.7	Condição da existência de um pistão de líquido.	61
2.8	Comprimentos médios dos pistões de líquido em tubos horizontais. . .	67
2.9	Comprimento do pistão de líquido versus ângulo de inclinação.	75
2.10	Valores das constantes da correlação de Mukherjee e Brill (1983). . .	78
2.11	Correlações para cálculo da velocidade de translação da bolha alongada.	81
4.1	Velocidades superficiais estudadas no escoamento horizontal-(m/s). .	121
4.2	Velocidades superficiais estudadas no escoamento ascendente 5° -(m/s).	121
4.3	Velocidades superficiais estudadas no escoamento ascendente 10° -(m/s).	121
4.4	Velocidades superficiais estudadas no escoamento descendente $-2,5^\circ$ - (m/s).	122
4.5	Velocidades superficiais estudadas no escoamento descendente -5° - (m/s).	122
6.1	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada V_{NB}	137
6.2	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias das velocidades do nariz e da cauda V_{MB}	137

6.3	Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultra-sônica e visualização com as correlações de Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984).	143
6.4	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias dos pistões de líquido.	145
6.5	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada - Escoamento +5°.	150
6.6	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias das médias das velocidades do nariz e da cauda - Escoamento +5°.	151
6.7	Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultra-sônica e visualização com as correlações de Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984).	155
6.8	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias dos pistões de líquido (V_{MPL})- Escoamento +5°.	156
6.9	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada, V_{NB} - Escoamento +10°.	161
6.10	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias das médias das velocidades do nariz e da cauda, V_{MB} - Escoamento +10°.	161
6.11	Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias dos pistões de líquido (V_{MPL})- Escoamento +10°.	164
1	Resumo dos Processo de Sinais Ultra-Sônicos.	211
2	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica no escoamento horizontal.	237
3	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização no escoamento horizontal.	238
4	Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica no escoamento horizontal.	239

5	Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica de visualização no escoamento horizontal.	240
6	Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica no escoamento horizontal.	241
7	Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica de visualização no escoamento horizontal.	242
8	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento +5°.	243
9	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +5°.	244
10	Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento +5°.	245
11	Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +5°.	246
12	Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica - Escoamento +5°.	247
13	Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica de visualização - Escoamento +5°.	248
14	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento +10°.	249
15	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +10°.	250
16	Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento +10°.	251
17	Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +10°.	252
18	Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica - Escoamento +10°.	253
19	Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica de visualização - Escoamento +10°.	254

20	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$	255
21	Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$	256
22	Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$	257
23	Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5°	258
24	Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5°	259
25	Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5°	260

Lista de Símbolos

A_1	Constante da correlação de Mukherjee e Brill (1983)
A_2	Constante da correlação de Mukherjee e Brill (1983)
A_3	Constante da correlação de Mukherjee e Brill (1983)
A_4	Constante da correlação de Mukherjee e Brill (1983)
A_5	Constante da correlação de Mukherjee e Brill (1983)
A_6	Constante da correlação de Mukherjee e Brill (1983)
A_G	Área da seção transversal ocupada pela fase gás
A_K	Área da seção transversal ocupada pela fase K
A_L	Área da seção transversal ocupada pela fase líquida
A_{LF}	Área da seção transversal ocupada pela fase líquido na frente do pistão de líquido
A_T	Área total da seção transversal do tubo
a	Constante relativa ao tipo de padrão de escoamento
B	Módulo de elasticidade volumétrica
B_o	Número de Bond
B_1	Constante relacionada à histerese elástica do material
B_2	Coefficiente de espalhamento da onda ultra-sônica

b	Constante relativa ao tipo de padrão de escoamento
C	Velocidade de propagação das ondas acústicas
C_0	Coefficiente de distribuição do perfil de velocidade no escoamento bifásico
C_1	Coefficiente de deslizamento
C_{BB}	Coefficiente de Beggs & Brill
C_d	Coefficiente de deslizamento segundo Fagundes et al. (1999)
C_{el}	Capacitância elétrica
C_F	Velocidade da onda do pistão de líquido
C_G	Constante para cálculo dos fatores de atrito
C_L	Constante para cálculo dos fatores de atrito
C_l	Velocidade de propagação das ondas acústicas longitudinais
C_t	Velocidade de propagação das ondas acústicas transversais
C_{TD}	Constante de Taitel e Dukler relacionando o tamanho da onda
C_W	Velocidade de propagação das ondas acústicas na água
c	Constante relativa ao tipo de padrão de escoamento
D	Diâmetro do transdutor
D_1	Constante empírica a ser determinada mediante calibração do sensor
D_2	Constante empírica a ser determinada mediante calibração do sensor
D_i	Diâmetro interno do tubo
D_L	Diâmetro hidráulico da fase líquido
D_G	Diâmetro hidráulico da fase gás

d	Constante relativa ao Coeficiente de Beggs & Brill
d_i	Diâmetro da bolha ou de uma interface imersa em água
d_p	Variação diferencial de pressão
E	Módulo de elasticidade
E_{el}	Tensão elétrica
E_f	Fluxo de energia
E_o	Número de Eötvös
e	Constante relativa ao Coeficiente de Beggs & Brill
$FC1$	Fator de correção das funções de fronteira dos padrões - Mapa de Baker
$FC2$	Fator de correção das funções de fronteira dos padrões - Mapa de Baker
Fr	Número de Froude
Fr_B	Número de Froude da bolha
Fr_c	Número de Froude crítico
Fr_{dL}	Número de Froude densimétrico do líquido
Fr_{dG}	Número de Froude densimétrico do gás
Fr_f	Número de Froude do filme de líquido
Fr_L	Número de Froude do líquido no pistão de líquido
Fr_{LH}	Número de Froude do líquido no pistão de líquido na horizontal
Fr_{LV}	Número de Froude do líquido no pistão de líquido na vertical
Fr_{Rel}	Número de Froude baseado na velocidade relativa

Fr_{TD}	Grupo adimensional para prever transição de padrões de escoamento - Taitel e Dukler (1976)
f	Constante relativa ao Coeficiente de Beggs & Brill
f	Frequência
f_G	Fator de atrito da fase gás com a parede do tubo
f_i	Fator de atrito interfacial
f_L	Fator de atrito da fase líquido com a parede do tubo
G	Módulo transversal de elasticidade
G_L	Vazão mássica do líquido
G_G	Vazão mássica do gás
g	Aceleração da gravidade
g	Constante relativa ao Coeficiente de Beggs & Brill
H	Horizontal
H_{Lf}	Fração de líquido (<i>holdup</i>) médio do filme de líquido
H_{Lfe}	Fração de líquido (<i>holdup</i>) no final do filme de líquido
$\overline{h_G}$	Altura da linha neutra do gás
$\overline{h_L}$	Altura da linha neutra do líquido
h_L	Altura de líquido
h_{LC}	Altura crítica da frente do pistão de líquido
I	Intensidade acústica
I_0	Intensidade do pulso ultra-sônico emitido pelo transdutor
I_{in}	Intensidade acústica da onda ultra-sônica incidente

I_{re}	Intensidade acústica da onda ultra-sônica refletida
I_{tr}	Intensidade acústica da onda ultra-sônica transmitida
In	Inclinado
K	Número de onda da onda ultra-sônica
K_a	Parâmetro acústico da interface imersa em líquido
K_{el}	Condutividade elétrica
K_{TD}	Grupo adimensional para prever transição de padrões de escoamento - Taitel e Dukler (1976)
L_1	Linha de transição entre padrões de escoamentos
L_2	Linha de transição entre padrões de escoamentos
L_3	Linha de transição entre padrões de escoamentos
L_4	Linha de transição entre padrões de escoamentos
L_B	Comprimento da bolha
L_{PL}	Comprimento do pistão de líquido
L_{S-ID}	Equação da transição do padrão segregado para o intermitente/distribuído
L_{I-D}	Equação da transição do padrão intermitente para o distribuído
m	Constante para cálculo dos fatores de atrito
N	Comprimento do campo próximo ultra-sônico
N_{Lv}	Número de velocidade do líquido
Nu	Número de Nusselt
n	Constante para cálculo dos fatores de atrito

P	Pressão
P_{ATM}	Pressão atmosférica
P_{SIST}	Pressão de operação do sistema
P_a	Pressão acústica
P_{in}	Pressão acústica da onda ultra-sônica incidente
P_{re}	Pressão acústica da onda ultra-sônica refletida
P_{tr}	Pressão acústica da onda ultra-sônica transmitida
p	Constante empírica a ser determinada mediante a calibração do sensor
Q	Vazão volumétrica
Q_G	Vazão volumétrica da fase gás
Q_K	Vazão volumétrica da fase K
Q_L	Vazão volumétrica da fase líquida
Q_{LF}	Taxa volumétrica de líquido na frente do pistão de líquido
Q_{LP}	Taxa volumétrica de líquido no posterior do pistão de líquido
Q_w	Termo de correção da correlação proposta por Bendiksen (1984) feito por Weber et al. (1986)
q_i	Variável independente
R	Resistência elétrica
Re	Número de Reynolds
Res	Resolução do instrumento
Re_L	Número de Reynolds somente da fase líquido
R_I	Coefficiente de reflexão da intensidade acústica

R_p	Coeficiente de reflexão da pressão acústica
R	Raio do tubo
r	Coeficiente de correlação de Pearson
S	Razão de deslizamento (<i>'slip ration'</i>)
S_i	Perímetro da interface gás-líquido
S_L	Perímetro molhado (fase líquido)
S_G	Perímetro da fase gás
S_T	Perímetro total
S_{TD}	Coeficiente de drenagem (sheltering)
T	Período
T_0	Constante pág58
T_I	Coeficiente de transmissão da intensidade acústica
T_p	Coeficiente de transmissão da pressão acústica
T_{TD}	Grupo adimensional para prever transição de padrões de escoamento - Taitel e Dukler (1976)
t	Tempo
te	Temperatura
U_D	Velocidade de deslocamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity) proposta por Bonnecaze et al. (1971)
U_{DMo}	Velocidade média das gotas de líquido dispersas no gás acima do filme de líquido a montante do pistão de líquido
U_{fG}	Velocidade do gás acima do filme de líquido
U_{fL}	Velocidade do filme de líquido abaixo da bolha alongada

U_{fLJu}	Velocidade média do filme de líquido a jusante do pistão de líquido
U_{fLMo}	Velocidade média do filme de líquido a montante do pistão de líquido
$U_{fL\infty}$	Velocidade do filme de líquido distante do nariz da bolha
U_{FS}	Velocidade do filme de líquido sob a bolha alongada
U_G	Velocidade da fase gás
U_{GfMo}	Velocidade média do gás acima do filme de líquido a montante do pistão de líquido
U_{GL}	Fluxo deslizante (drift flux)
U_{GP}	Velocidade da fase gás no pistão de líquido
U_{GS}	Velocidade superficial do gás
U_{inc}	Valor da incerteza de um resultado
U_K	Velocidade da fase K
U_{KS}	Velocidade superficial da fase K
U_L	Velocidade da fase líquido
U_{LP}	Velocidade da fase líquido no pistão de líquido
U_{LS}	Velocidade superficial do líquido
U_M	Velocidade da mistura
U_{MPL}	Velocidade da mistura no pistão de líquido
U_{qi}	Valor da incerteza expandida para um nível de confiança
U_{ra}	Velocidade relativa entre o sensor e o meio
U_{Rel}	Velocidade relativa entre as velocidades das fases
V	Vertical

V_0	Velocidade de deslocamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity)
V_{0B}	Velocidade de deslocamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity) proposta por Bonnecaze et al. (1971)
V_{0H}	Componente horizontal da velocidade de deslocamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity)
V_{0N}	Velocidade de deslocamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity) normalizada
V_{0V}	Componente vertical da velocidade de deslocamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity)
V_B	Velocidade de translação da bolha alongada
V_{FPL}	Velocidade da frente do pistão de líquido
V_K	Volume da fase K
V_{K^*}	Volume da fase K^*
V_L	Velocidade do líquido
V_M	Velocidade da mistura no pistão de líquido
V_{NB}	Velocidade do nariz da bolha alongada
V_{PL}	Velocidade média do pistão de líquido a frente da bolha
V_{PPL}	Velocidade do posterior do pistão de líquido
V_T	Volume total
v_0	Velocidade de máxima vibração da partícula
X	Grupo adimensional para prever transição de padrões de escoamento - Taitel e Dukler (1976)
X_{Mn}	Coefficiente de Mandhane

x	Distância
Y	Grupo adimensional para prever transição de padrões de escoamento - Taitel e Dukler (1976)
Y_{Mn}	Coefficiente de Mandhane
Z	Impedância acústica da onda ultra-sônica
Z_l	Impedância acústica da onda ultra-sônica longitudinal
Z_t	Impedância acústica da onda ultra-sônica transversal

Letras Gregas

α_G	Fração de volume da fase gás
α_{GFMo}	Fração de vazio acima do filme de líquido a montante do pistão de líquido
α_{GP}	Fração de volume da fase gás no pistão de líquido
α_K	Fração de volume da fase K
α_L	Fração de volume da fase líquida
α_{LB}	Fração de líquido na seção transversal da bolha alongada
α_{LfGMo}	Fração de líquido, na forma de gotas, acima do filme de líquido a montante do pistão de líquido
α_{LfJu}	Fração de líquido no filme de líquido a jusante do pistão de líquido
α_{LHor}	Fração de volume da fase líquido para escoamento horizontal
α_{LJu}	Fração de líquido em toda seção transversal do tubo a jusante do pistão de líquido
α_{LP}	Fração de volume da fase líquido no pistão de líquido

$\alpha_{L\infty}$	Fração de líquido da bolha alongada distante do nariz da bolha
β	Ângulo de inclinação do tubo a partir da horizontal
δ_B	Fator relativo a geometria do tubo
$\epsilon_e l$	Constante dielétrica
ϵ_T	Coefficiente total de atenuação da intensidade acústica da onda ultra-sônica
ϵ_D	Coefficiente de atenuação da intensidade acústica da onda ultra-sônica por difusão
ϵ_V	Coefficiente de atenuação da intensidade acústica da onda ultra-sônica por atrito viscoso
φ	Fluxo líquido abaixo da bolha
γ	Ângulo entre o eixo do tubo e a direção vertical
λ	Comprimento de onda da onda ultra-sônica
λ_G	Fração de descarga da fase gás
λ_K	Fração de descarga da fase K
λ_L	Fração de descarga da fase líquido
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
μ_A	Viscosidade dinâmica do ar
μ_f	Viscosidade inversa
μ_G	Viscosidade dinâmica do gás
μ_L	Viscosidade dinâmica do líquido
μ_W	Viscosidade dinâmica da água
θ	Ângulo do setor circular ou segmento da fase líquida, ver figura ??.

θ_1	Ângulo de incidência da onda ultra-sônica
θ_2	Ângulo de refração da onda ultra-sônica
ρ	Massa específica do meio
ρ_A	Massa específica do ar
ρ_G	Massa específica do gás
ρ_L	Massa específica do líquido
ρ_W	Massa específica da água
σ	Tensão superficial dos fluidos
σ_{AW}	Tensão superficial ar-água
Σ	Parâmetro da tensão superficial
τ_W	Tensão de cisalhamento entre as fases e a parede do tubo e na interface das fases
τ_{Wi}	Tensão de cisalhamento na interface gás-líquido
τ_{WG}	Tensão de cisalhamento entre a fase gás e a parede do tubo
τ_{WL}	Tensão de cisalhamento entre a fase líquido e a parede do tubo
ν	Coefficiente de Poisson
ν_L	Viscosidade cinemática da fase líquida
ξ	Distância entre um ponto qualquer na bolha e o seu nariz, dividido pelo diâmetro interno do tubo
ψ	Diâmetro médio do grão de metal policristalino
ψ_{BB}	Fator de correção da fração de líquido para escoamento inclinado

Subscrito

<i>A</i>	Ar
<i>ATM</i>	Atmosfera
<i>a</i>	Acústico
<i>B</i>	Bolha
<i>BB</i>	Beggs-Brill
<i>c</i>	Crítico
<i>D</i>	Difuso
<i>e</i>	Elipse
<i>el</i>	Elétrico
<i>F</i>	Frente
<i>f</i>	Filme de líquido
<i>G</i>	Gás
<i>GP</i>	Gás no pistão de líquido
<i>GS</i>	Gás superficial
<i>GU</i>	Deslizamento
<i>H</i>	Horizontal
<i>I</i>	Intensidade
<i>i</i>	Interface
<i>in</i>	Incidente
<i>Ju</i>	Jusante
<i>K</i>	Fase K

<i>KS</i>	Fase K superficial
<i>L</i>	Líquido
<i>LP</i>	Líquido no pistão de líquido
<i>LS</i>	Líquido superficial
<i>l</i>	Longitudinal
<i>M</i>	Mistura
<i>Mo</i>	Montante
<i>P</i>	Posterior
<i>PL</i>	Pistão de líquido
<i>p</i>	Pressão
<i>Rel</i>	Relativo
<i>re</i>	Refletida
<i>SIST</i>	Sistema
<i>T</i>	Total
<i>TD</i>	Taitel-Dukler
<i>t</i>	Transversal
<i>tr</i>	Transmitida
<i>V</i>	Vertical
<i>v</i>	Viscoso
<i>W</i>	Água
∞	Muito distante

Capítulo 1

Introdução

Escoamentos bifásicos ocorrem em diversos processos industriais como em plantas nucleares, de exploração de petróleo e química. O conhecimento dos fenômenos envolvidos nesses escoamentos é de grande importância para o desenvolvimento de equipamentos mais eficientes, seguros e econômicos. Em plantas nucleares o escoamento bifásico ocorre no sistema de refrigeração do reator onde a perda do fluido refrigerante (LOCA - Acidente de Perda de Refrigerante) pode provocar o aparecimento de diferentes tipos de escoamento bifásico e devido a ineficiência de troca térmica colocar em risco a integridade estrutural do reator. Na indústria do petróleo os escoamentos bifásicos ocorrem freqüentemente em oleodutos submarinos e terrestres onde o óleo e o gás sujeitos as diferentes temperaturas e pressões podem originar sedimentos que comprometam o escoamento, necessitando assim do conhecimento dos parâmetros bifásicos desenvolvidos durante o escoamento. Na indústria química o projeto de equipamentos requer informações a respeito das velocidades das fases e dos tipos de padrões de escoamento.

O padrão de escoamento intermitente (pistonado e slug) é um dos mais comuns no escoamento bifásico e devido apresentar uma distribuição não uniforme das fases e uma instabilidade temporal de suas interfaces é um dos mais complexos. A predição de parâmetros bifásicos no escoamento intermitente, como as velocidades e comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido são de particular interesse, pois apresentam grande influência nos processos de troca térmica. Em plantas nucleares o controle dos parâmetros dos padrões de escoamento bifásico é realizado

por meio de códigos computacionais que utilizam correlações empíricas deduzidas a partir de resultados experimentais.

A grande maioria dos trabalhos concernentes à parâmetros interfaciais se concentra principalmente nos escoamentos horizontal e vertical. Encontra-se na literatura muitos trabalhos a respeito de parâmetros interfaciais no escoamento intermitente, porém não há estudos que abordem o comportamento das velocidades e comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido para diferentes ângulos de inclinação. Do mesmo modo, não há trabalhos concernentes ao perfil da cauda da bolha alongada.

Para medir parâmetros bifásicos existe uma gama variada de técnicas que vem sendo desenvolvidas ao longo dos anos. A primeira grande divisão entre estas técnicas é a interação do sensor com a mistura bifásica em escoamento, ou seja, as técnicas se dividem inicialmente em invasivas e não invasivas. As técnicas não invasivas são mais indicadas em plantas nucleares em razão de não apresentarem riscos de vazamento. A técnica escolhida para este trabalho foi a técnica ultra-sônica não invasiva, pois vem demonstrando possuir um grande potencial de utilização, devido às suas características adequadas para aplicações em tubos metálicos sob altas pressões e temperaturas.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo experimental do escoamento bifásico intermitente ar-água, em tubo circular horizontal e inclinado de diâmetro interno 25,6 mm. Os parâmetros interfaciais estudados foram às velocidades e comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido, assim como o perfil longitudinal da cauda da bolha alongada. No escoamento ascendente os ângulos estudados foram 5° e 10° com faixas de velocidades superficiais do líquido e do gás respectivamente de 0,22 a 1,08 m/s e de 0,76 a 2,07 m/s. No escoamento descendente os ângulos foram de $-2,5^\circ$ e -5° com faixas de velocidades superficiais do líquido e do gás respectivamente de 0,81 a 1,62 m/s e de 0,74 a 2,02 m/s. A faixa de velocidades superficiais do escoamento horizontal foram as mesmas do es-

coamento ascendente. Para cada ângulo foram estudados nove pontos. A região onde foram realizadas as medidas dos parâmetros interfaciais apresentou valores de pressão bem próximo da atmosférica. Os parâmetros medidos foram realizados por meio de uma técnica ultra-sônica de alta velocidade e comparados com uma técnica por visualização.

Para alcançar esses objetivos, inicialmente foram realizados trabalhos experimentais para seleção do tipo do transdutor ultra-sônico, assim foi realizado um estudo da percepção dos transdutores em relação às interfaces, de maneira a selecionar o transdutor mais indicado para as condições operacionais a serem estudadas. Em paralelo foi aprimorado o sistema ultra-sônico de alta velocidade de forma a possibilitar a aquisição, seleção e registro de sinais ultra-sônicos em alta velocidade operando com quatro transdutores simultaneamente. Foi concluída a montagem da seção de testes colocando a mesma em funcionamento e, para cada ângulo estudado, foi realizada a aquisição de dados, tratamento dos sinais e, por último a análise dos resultados e conclusão.

1.2 Organização do Trabalho

No capítulo 2 são apresentados os fundamentos acústicos relativos à aplicação da técnica ultra-sônica e a respectiva revisão bibliográfica, depois é apresentado os fundamentos dos padrões de escoamento bifásico com a revisão bibliográfica e as principais técnicas utilizadas para medição de parâmetros interfaciais. Na última seção é apresentada uma revisão bibliográfica sobre escoamentos bifásicos em tubulação inclinada.

No capítulo 3 é apresentado um estudo experimental da interação dos campos ultra-sônicos gerados por dois transdutores diferentes interagindo com esferas de aço simulando bolhas de ar. São apresentados os fenômenos observados e resultados qualitativos que demonstram a importância da correta seleção dos transdutores para aplicação em escoamentos bifásicos.

No capítulo 4 é apresentada a descrição da instalação experimental, apresentando seus principais componentes e funcionamento.

No capítulo 5 é apresentada a descrição dos procedimentos experimentais para tratamento dos sinais ultra-sônicos e das imagens.

No capítulo 6 são apresentados os valores medidos das velocidades e comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido, sendo feitas correlações com as velocidades superficiais do líquido e do gás. São comparados os resultados obtidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização. Também são apresentados os resultados obtidos do perfil da cauda da bolha alongada. É apresentada uma discussão dos parâmetros interfaciais estudados. No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões e sugestões de trabalhos.

Nos apêndices são apresentados a descrição da calibração estática do sistema ultra-sônico, resultados complementares do capítulo 3, a descrição da fabricação e montagem da seção de testes e tabelas dos resultados experimentais.

Capítulo 2

Fundamentos e Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os fundamentos acústicos relativos as técnicas ultra-sônicas e os fundamentos dos escoamentos bifásicos. Em seguida é realizada uma revisão bibliográfica sobre escoamentos bifásicos em tubulação inclinada e a aplicação das técnicas ultra-sônicas aplicadas em escoamentos bifásicos.

2.1 Princípios da Propagação das Ondas Ultra-Sônicas

Os princípios apresentados neste capítulo são baseados na mecânica clássica que explica os movimentos dos corpos materiais através da lei do movimento de Newton. Esta explicação é satisfatória desde que os corpos não sejam muito pequenos, isto é, maiores que $0,1\mu m$, e não se movimentem muito rápido, ou seja, apresentam velocidade menor que um décimo da velocidade da luz. Todas as substâncias são constituídas de pequenas partículas de matéria interligadas por forças elásticas que permitem o movimento das mesmas em relação às suas posições de equilíbrio. A figura 2.1 ilustra as forças elásticas existentes entre as partículas por meio de molas, quando o sistema está em posição de equilíbrio. Se uma das partículas sofrer perturbação por uma força externa, o efeito dessa perturbação se propagará por todas as partículas da substância, sendo, portanto, a maneira como a propagação das ondas se realiza em um meio dito elástico, de acordo com a Mecânica Clássica. A figura 2.2

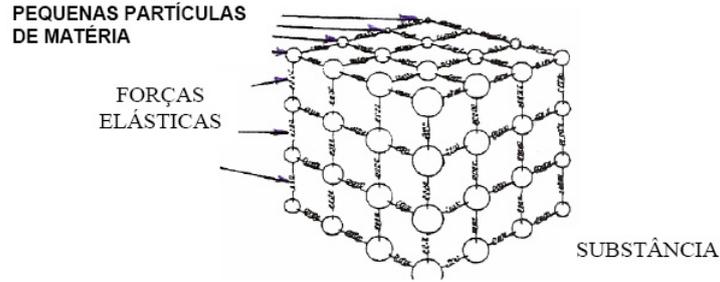


Figura 2.1: Força elástica.

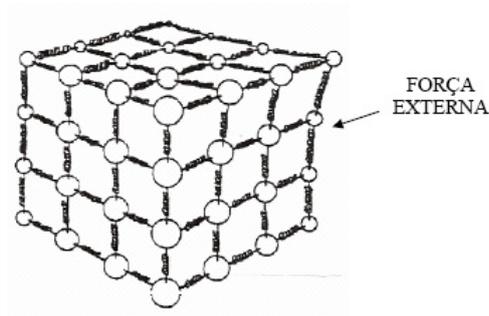


Figura 2.2: Força Externa

ilustra a perturbação sofrida pelas partículas da substância quando sujeita a uma força externa.

Quando um material está fora de posição de equilíbrio, porém não estando submetido a cargas externas, suas partículas individuais realizam oscilações elásticas. Em um meio elástico as partículas se movimentam, porém não migram de sua posição inicial, somente a energia se propaga através delas.

A amplitude e a energia das ondas sonoras no meio elástico são dependentes da quantidade de energia fornecida e a perda de amplitude ou de energia (atenuação) das mesmas, bem como sua velocidade, depende das propriedades do meio material no qual se propagam.

Ondas ultra-sônicas são ondas mecânicas (em contraste, por exemplo, com a luz e raios-X, que são ondas eletromagnéticas) com frequência de vibração acima de 20KHz , comportando-se essencialmente da mesma forma que as ondas sonoras audíveis. Portanto os fenômenos acústicos aplicam-se as ondas ultra-sônicas.

Em muitos aspectos, um feixe ultra-sônico é similar a um feixe de luz, apesar de terem fundamentalmente origens diferentes. Luz e som têm muitas similaridades por causa da dualidade onda/partícula comum as duas. Cada um se propaga a uma velocidade característica em dado meio homogêneo, suas velocidades dependem das propriedades do meio e não das características da onda.

É comum na literatura utilizar a interpretação de fenômenos ópticos e compará-los com fenômenos acústicos, porém em razão de algumas particularidades, isto pode induzir a erros de interpretação. Por exemplo, o comprimento da onda ultra-sônica varia na ordem de cm a μm , já a luz apresenta uma faixa bem menor variando entre 400 a 700 nm . A propagação da onda ultra-sônica está relacionada com as propriedades elástica, densidade e termofísicas, enquanto a da luz se relaciona com as propriedades dielétricas e de permeabilidade. As ondas ultra-sônicas apresentam *coerência* entre pulsos, enquanto a luz não apresenta esta característica (entende-se como coerência a preservação da fase entre um pulso e o seguinte). A luz pode ser polarizada, enquanto que, somente no sólido, as ondas ultra-sônicas cisalhantes estão sujeitas a esse fenômeno.

2.1.1 Propagação das Ondas Ultra-Sônicas

De acordo com o modo de deslocamento das partículas, a propagação das ondas ultra-sônicas se classificam em: ondas transversais, longitudinais, de Lamb e superficiais. As duas primeiras são fenômenos importantes na aplicação da técnica ultra-sônica em escoamentos bifásicos.

Ondas Transversais

Também chamadas de ondas de cisalhamento, são muito utilizadas em ensaios não destrutivos de materiais metálicos. Para propagação das ondas transversais é necessário que cada partícula apresente uma forte força de atração com a partícula vizinha, permitindo com isso o arraste entre superfícies da partícula adjacente, de maneira que elas deslizem como planos adjacentes, formando vales e picos. A figura 2.3 apresenta a representação da propagação desta onda, indicando as direções de sua propagação e das partículas que compõem o material.

Nos gases e líquidos as ondas transversais não conseguem se propagar. Nos gases, as forças de atração entre moléculas são tão pequenas que as ondas cisalhantes não se propagam. O mesmo acontece com os líquidos, a menos que sejam bem viscosos ou se apresentem em uma camada muito fina.

Na aplicação das técnicas ultra-sônicas em escoamentos bifásicos as ondas transversais ocorrem na parede do tubo, estando relacionada com o fenômeno das múltiplas reflexões. Conforme será visto no capítulo 3, a propagação desta forma de onda pode causar interferências nas ondas ultra-sônicas que retornam ao transdutor.

A velocidade de propagação das ondas transversais nos meios sólidos elásticos é função das constantes elásticas do material, e segundo Krautkrämer e Krautkrämer (1990) seu valor pode ser obtido pela equação abaixo:

$$C_t = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (2.1)$$

onde G é o módulo transversal de elasticidade do material e ρ sua massa específica.

Ondas Longitudinais

Algumas vezes chamadas ondas de compressão, se propagam nos materiais elásticos como uma série alternada de compressões e dilatações, nas quais as partículas transmitem a vibração da onda, para frente e para trás na direção de sua propagação. A figura 2.3 apresenta a representação da propagação desta onda, indicando as direções de sua propagação e das partículas que compõem o material.

Elas se propagam facilmente em meios líquidos e gasosos como também em sólidos elásticos. Os livres caminhos médios nas moléculas de líquidos e gases, a pressão de 1 *atm*, são tão pequenos que as ondas longitudinais podem ser propagadas simplesmente pela colisão elástica de uma molécula com a próxima.

A velocidade de propagação de pulsos longitudinais, em meios líquidos ou gasosos, é determinada pelas propriedades mecânicas do meio. Segundo Krautkrämer e Krautkrämer (1990) e Kuttruff (1991) seu valor pode ser obtido pela equação abaixo:

$$C_l = \sqrt{\frac{B}{\rho}}, \quad (2.2)$$

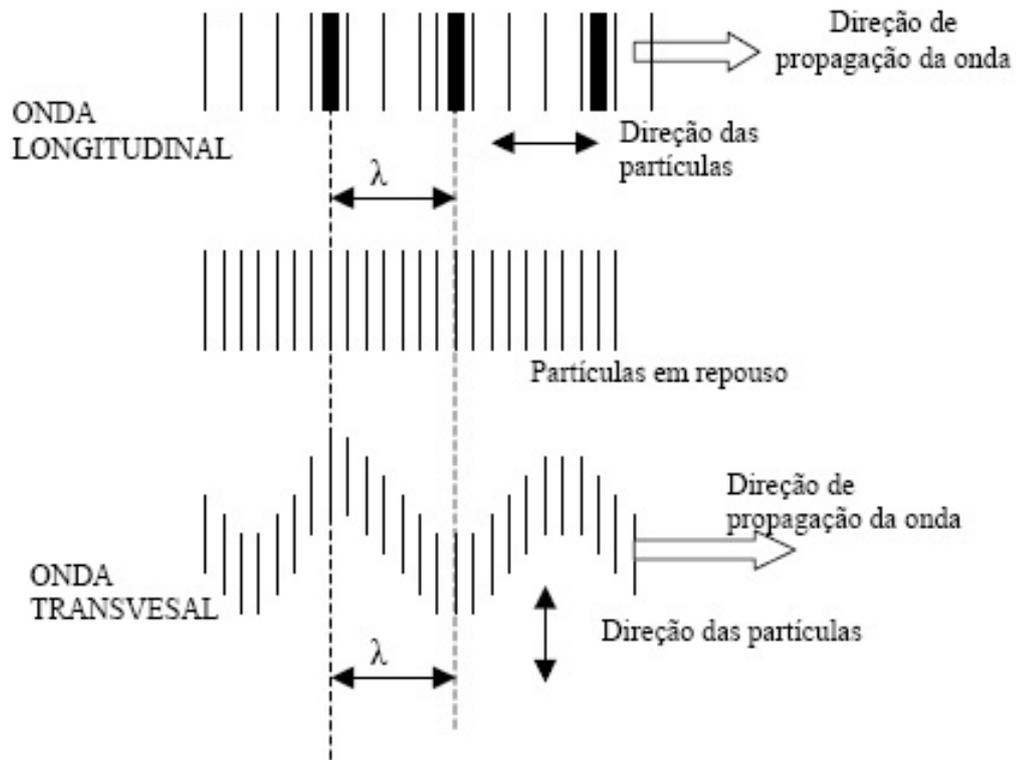


Figura 2.3: Direções de propagação das ondas acústicas e de suas respectivas partículas

onde ρ é a massa específica do meio e B é o módulo de elasticidade volumétrico. A definição geral do módulo de elasticidade é a razão (negativa) entre as mudanças de pressão dP e sua consequente deformação volumétrica dV/V (alteração fracional de volume), sendo expressa por:

$$B = \frac{-dP}{\frac{dV}{V}}. \quad (2.3)$$

Nos meios sólidos elásticos a velocidade de propagação das ondas longitudinais é determinada pelas constantes elásticas do material, segundo Krautkrämer e Krautkrämer (1990) e Gómez et al. (1980) seu valor pode ser obtido pela equação abaixo:

$$C_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad (2.4)$$

onde E é o módulo de elasticidade (módulo de Young) do material, ρ é a massa específica e ν o coeficiente de Poisson.

As fórmulas anteriores fornecem valores das velocidades de propagação das ondas acústicas bem próximas dos valores obtidos experimentalmente. A tabela 2.1 apresenta valores das velocidades acústicas de materiais normalmente encontrados na literatura e utilizados para armazenamento ou condução de meio bifásico utilizando-se técnicas ultra-sônicas (Kuttruff, 1991).

Tabela 2.1: Valores das velocidades de propagação das ondas acústicas.

Material	Velocidade Longitudinal (m/s)	Velocidade Transversal (m/s)
Aço inoxidável	5790	3100
Acrílico	2680	1100
Alumínio	6420	3040

Na literatura e na maioria das aplicações industriais a espessura dos materiais dos tubos utilizados nos escoamentos bifásicos é da ordem de milímetros, não verificando assim influência significativa da temperatura no cálculo do tempo de propagação da onda acústica, mesmo quando a avaliação é da ordem de nanosegundos. Porém, para líquidos, há uma influência significativa da temperatura no cálculo da velocidade de propagação das ondas, principalmente quando a análise do tempo de propagação é feita na ordem de nanosegundos. Lubbers e Graaf (1998) propuseram a utilização da equação 2.5 para cálculo da velocidade longitudinal de propagação do som na água, que fornece um erro máximo de $0,18 m/s$, para faixa de temperatura de $15^{\circ}C - 35^{\circ}C$.

$$C_W = 1404,3 + 4,7te - 0,04te^2. \quad (2.5)$$

onde te é a temperatura em $^{\circ}C$ e C_W a velocidade longitudinal do som na água em m/s .

2.1.2 Comprimento e Número de Onda

Em materiais perfeitamente elásticos a uma dada temperatura e pressão, a velocidade de propagação C , para todas as formas de onda é constante, apresentando uma relação com o comprimento de onda λ e a frequência f ou período T , sendo

expressa pela equação:

$$\lambda = \frac{C}{f} = CT. \quad (2.6)$$

Um parâmetro muito utilizado na literatura é o número de onda (k) que é expresso pela equação abaixo:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{C}. \quad (2.7)$$

Outro parâmetro também muito utilizado na literatura associado ao comprimento de onda é o número de onda K_a , que relaciona o perímetro da bolha, ou da partícula imersa na água, com o comprimento de onda;

$$K_a = \frac{2\pi a_e}{\lambda}, \quad (2.8)$$

onde a_e é o raio da bolha ou da partícula.

2.1.3 Geração de Ondas Ultra-Sônicas

Efeito Piezelétrico

É o fenômeno que ocorre quando cristais anisotrópicos desenvolvem cargas elétricas quando submetidos a deformações mecânicas. Ao aplicar cargas mecânicas nas faces opostas de uma lâmina de cristal ocorrerá a formação de cargas elétricas de polaridades contrárias em cada uma das faces. As cargas elétricas desenvolvidas nas lâminas são proporcionais às cargas mecânicas aplicadas.

Efeito Lippmann

É o fenômeno que se dá quando ocorrem deformações mecânicas nos cristais anisotrópicos caso estejam submetidos a tensões elétricas. Trata-se de um efeito recíproco do efeito piezelétrico. A lâmina de cristal ao sofrer uma tensão alternada sofrerá deformações mecânicas sucessivas passando a vibrar. A lâmina se contrairá na primeira metade do ciclo da corrente alternada e se expandirá na outra metade. A frequência da vibração mecânica será a mesma da tensão alternada.

Os piezo materiais normalmente utilizados são o quartzo (SiO_2), niobato de lítio (Li_2NbO_3), metaniobato de chumbo ($PbNb_2O_6$) e titanato de bário ($BaTiO_3$)

cuja designação comercial é *PMN*. Os dois primeiros são efetivamente cristais anisotrópicos e os dois últimos não podem ser obtidos na forma de simples cristais, mas somente na forma de pós (normalmente óxidos de metais). As cerâmicas piezelétricas são fabricadas pelo processo de sinterização e sua forma pode ser adaptada para uma variedade de aplicações.

O titanato de bário (*PMN*) apresenta elevado módulo piezelétrico, capacidade de transformar energia elétrica em mecânica, gerando ondas ultra-sônicas de alta energia, com baixo custo e durabilidade, sendo por isso, normalmente mais utilizado. Não é indicado para frequências acima de 15MHz . Sua temperatura crítica, temperatura acima da qual perde suas propriedades ferromagnéticas, é 120°C . O quartzo apresenta alta temperatura crítica (573°C), mas baixo módulo piezelétrico e não pode ser utilizado com frequências superiores a 10MHz Kuttruff (1991), Nader (2002).

As cerâmicas piezelétricas utilizadas no estudo experimental da interação do campo ultra-sônico com esferas de aço, capítulo 3, bem como em próximos experimentos, são de titanato de bário (*PMN*) por apresentarem elevado módulo piezelétrico e faixa de temperatura de trabalho compatível com a realizada nos experimentos.

O titanato de bário tem demonstrado uma performance próxima de um pistão ideal (Hayman e Weight, 1979, Weight e Hayman, 1978).

Transdutores

Transdutores ultra-sônicos são dispositivos que transformam alternadamente energia elétrica em mecânica.

Os transdutores são constituídos basicamente por sete elementos: carcaça, material piezelétrico, bloco amortecedor, conector, condutor elétrico, eletrodos, sapata ou membrana plástica protetora. A figura 2.4 apresenta os principais componentes de um transdutor.

Os transdutores podem ser utilizados em contato direto com o fluido em escoamento, técnica invasiva, ou apoiados em superfícies de separação, como tubos, técnica não intrusiva. Os transdutores podem ser em utilizados em fluidos opacos,

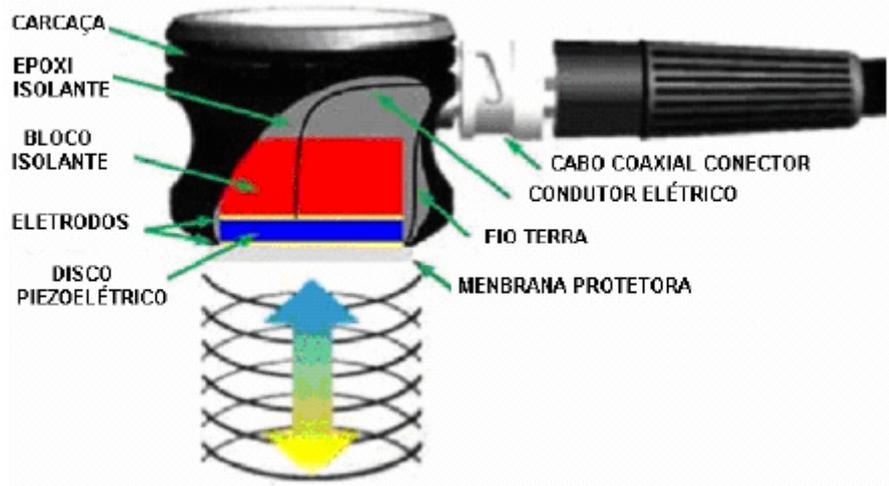


Figura 2.4: Transdutor.

viscosos e até mesmo quimicamente agressivos. Segundo Boyer et al. (2002) podem trabalhar com temperaturas até 140°C e pressões até 20MPa . Para temperaturas acima de 140°C , utilizando a técnica não intrusiva, pode-se utilizar sapatas que isolem termicamente o transdutor da superfície aquecida do tubo.

A especificação correta dos transdutores têm importância fundamental para a obtenção de resultados confiáveis, assim duas propriedades são desejáveis: sensibilidade e resolução.

Sensibilidade é a capacidade do transdutor em detectar pequenas discontinuidades, sendo necessário, portanto apresentar alto módulo piezoelétrico. A sensibilidade do transdutor implica que o mesmo não seja capaz de detectar da mesma maneira um sinal no qual tenha ocorrido alteração entre ondas ultra-sônicas sucessivas, de modo a garantir a *coerência* entre fases sucessivas.

Resolução é a capacidade do transdutor em detectar, com precisão, discontinuidades próximas umas das outras. Na aplicação em escoamentos bifásicos, refere-se a capacidade em detectar variações interfaciais próximas como as que ocorrem na superfície gás-líquido.

Embora os materiais piezoelétricos possuam suas próprias características, as propriedades de sensibilidade e resolução dependerão muito de como o cristal é amortecido. O amortecimento artificial do cristal alojado no transdutor ocorre sob

a ação do bloco amortecedor. Quanto maior for o amortecimento provocado pelo transdutor, maior será seu poder de resolução e menor a sensibilidade.

Na aplicação da técnica ultra-sônica em escoamentos bifásicos, além da sensibilidade e resolução, a percepção e localização de interfaces ao longo da seção transversal do tubo são importantes parâmetros na seleção do transdutor.

Campos Ultra-Sônicos

As características espaciais do campo ultra-sônico são funções da dimensão do transdutor e do comprimento de onda da onda ultra-sônica (Chang e Morala, 1990). Este campo é dividido em duas regiões distintas: o campo próximo e o campo distante. A figura 2.5 apresenta um desenho típico do campo ultra-sônico, onde N corresponde a região do campo próximo e a região seguinte, após a ocorrência do máximo de pressão acústica, correspondem ao campo distante.

Para os transdutores de material piezoelétrico de seção circular, o comprimento do campo próximo é expresso pela equação abaixo:

$$N = \frac{D^2 - \lambda}{4\lambda}, \quad (2.9)$$

onde λ é o comprimento da onda ultra-sônica e D o diâmetro do transdutor.

Como na maioria das aplicações o diâmetro do cristal é muito maior que o comprimento de onda, a expressão pode ser simplificada, de acordo com Krautkrämer e

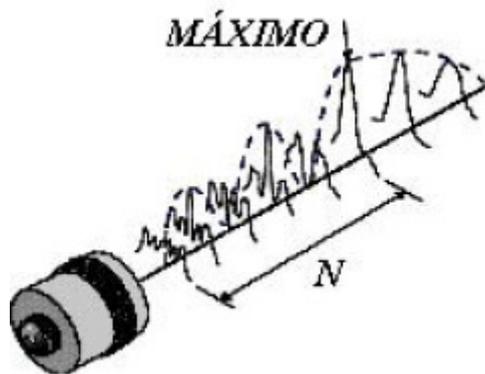


Figura 2.5: Campos ultra-sônicos.

Krautkrämer (1990), para:

$$N = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{fD^2}{4C}. \quad (2.10)$$

O campo ultra-sônico localizado a frente do transdutor cria uma região denominada campo morto, “*dead zone*”, decorrente do pulso inicial, que torna impossível a percepção de interfaces por reflexão quando se pretende aplicar a técnica pulso-eco medindo a intensidade do sinal ultra-sônico (Lamy et al., 2007a,b).

No campo próximo ocorrem grandes variações da pressão ultra-sônica, que oscila entre máximos e mínimos em razão das ondas esféricas pontuais formadas na superfície do disco piezoelétrico que, à medida que suas frentes de onda se afastam, se expandem e, conseqüentemente, se sobrepõem formando pontos de máximos e mínimos de pressão ultra-sônica.

No campo distante ocorre a divergência do feixe ultra-sônico e o decaimento da pressão à medida que se afasta da fonte emissora, ocorrendo também o decaimento da pressão ao longo da seção transversal do campo ultra-sônico à proporção que se distancia do eixo longitudinal.

2.1.4 Grandezas e Fenômenos Físicos Relativos a Propagação das Ondas Acústicas

Impedância Acústica

É a resistência que se opõem à vibração da onda, ou seja, representa a dificuldade ou resistência a propagação do som através de um determinado meio. Corresponde ao produto da densidade do material pela velocidade de propagação do som no mesmo e, portanto existe impedância acústica relativa a propagação das ondas longitudinais e das ondas transversais. As impedâncias acústicas relativas a propagação das ondas longitudinais e transversais são expressas, respectivamente, pelas equações abaixo:

$$Z_l = \rho C_l, \quad (2.11)$$

$$Z_t = \rho C_t. \quad (2.12)$$

A tabela 2.2 apresenta valores de impedâncias acústicas relativa a propagação

das ondas longitudinais de materiais e substâncias normalmente encontrados na literatura e aplicados nas técnicas ultra-sônicas para escoamento bifásico (Krautkrämer e Krautkrämer, 1990, Kuttruff, 1991).

Tabela 2.2: Impedâncias Acústicas.

MEIO DE PROPAGAÇÃO	IMPEDÂNCIA ACÚSTICA (Z) (kg/m^2s)
Aço inoxidável (série 300)	$45,5 \times 10^6$
Alumínio	$17,2 \times 10^6$
Acrílico	$3,2 \times 10^6$
Água ($20^\circ C$)	$1,48 \times 10^6$
Ar ($0^\circ C$)	$0,0033 \times 10^6$

Difração e Espalhamento

Segundo Nepomuceno (1980) a trajetória de propagação das ondas ultra-sônicas em um meio contínuo ocorre em linha reta a partir da fonte emissora, porém quando a onda ultra-sônica incide sobre um obstáculo, como uma bolha, três fenômenos poderão ocorrer: difração, espalhamento e reflexão. Se durante a propagação da onda ultra-sônica ocorrer desvio em decorrência da incidência da mesma sobre um obstáculo de dimensões de mesma ordem de grandeza do comprimento de onda, tem-se o fenômeno da difração. Nas mesmas condições, porém existindo muitos obstáculos ocorre o fenômeno do espalhamento das onda ultra-sônica. A figura 2.6 mostra a direção de propagação da onda ultra-sônica em função de comprimento de onda (λ) e tamanho do obstáculo. Se o comprimento de onda for muito menor que o obstáculo ocorre o fenômeno da reflexão.

Quanto menor o comprimento de onda da onda ultra-sônica (λ), menor a possibilidade da ocorrência do fenômeno de difração. Portanto, se o comprimento de onda for muito pequeno, comparado as dimensões do obstáculo ($\lambda \ll d$), o efeito da difração pode ser ignorado e a onda acústica pode ser considerada como se propagando em linha reta (Chang e Morala, 1990).

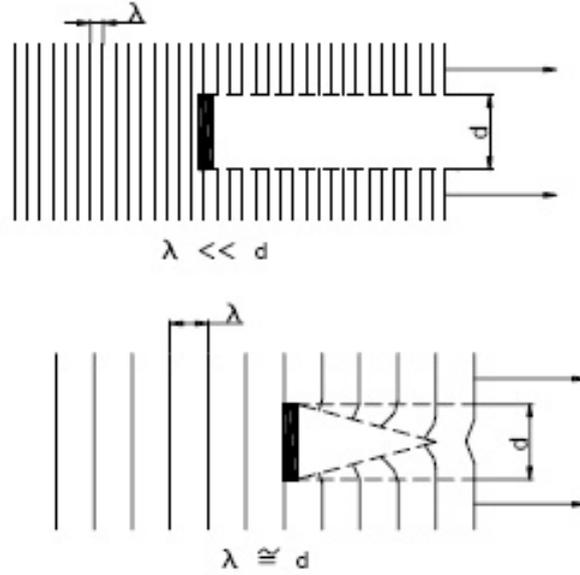


Figura 2.6: Difração da onda.

Intensidade Acústica

A intensidade acústica gerada por para um pistão rígido executando oscilações senoidais, com velocidade de máxima vibração da partícula, v_0 , é dada por (Gómez et al., 1980, Kuttruff, 1991):

$$I = \frac{1}{2} \rho C v_0^2. \quad (2.13)$$

A intensidade acústica expressa a quantidade de energia que passa por unidade de área na unidade de tempo W/m^2 .

Em um meio homogêneo a atenuação da intensidade da onda ultra-sônica é dada por (Gómez et al., 1980, Krautkrämer e Krautkrämer, 1990):

$$I = I_0 (\exp)^{-\epsilon_T x}, \quad (2.14)$$

onde I_0 é a intensidade do pulso ultra-sônico emitido pelo transdutor, I é a intensidade do pulso ultra-sônico que retorna, ϵ_T é o coeficiente de atenuação e x é à distância percorrida pela onda ultra-sônica.

Segundo Krautkrämer e Krautkrämer (1990) e Nepomuceno (1980) a atenuação da onda ultra-sônica é função da frequência e do meio de propagação. À medida que a frequência aumenta, a atenuação cresce linearmente e as perdas ocor-

rem praticamente devido ao atrito interno, *atrito viscoso*, que transforma a energia de propagação da onda ultra-sônica em calor. Na literatura esta forma de atenuação é denominada coeficiente de atenuação (ϵ_v). Outro tipo de atenuação é função da relação entre o comprimento da onda ultra-sônica e a dimensão das partículas dispersas no meio na qual ela se propaga, λ/d . Em experimentos multifásicos utilizando técnicas ultra-sônicas, a atenuação é influenciada pela relação λ/d que ocorre nas interfaces gás-líquido e nos grãos metalúrgicos dispersos na matriz metálica do material do tubo por onde ocorre o escoamento da mistura multifásica. Segundo Papadakis (1965b), quando a relação for bem maior do que a unidade tem-se o espalhamento de Rayleigh e a atenuação é proporcional à quarta potência da frequência. Quando a relação for menor que a unidade, tem-se o espalhamento difuso e a atenuação é inversamente proporcional à dimensão da partícula. Estes tipos de atenuação são relacionados ao coeficiente de atenuação (ϵ_D).

Nos escoamentos bifásicos a redução da amplitude do sinal ultra-sônico que retorna ao transdutor é também influenciada pela superfície transiente da interface gás-líquido que desvia parte do feixe ultra-sônico de maior energia para fora da superfície receptora do transdutor.

Segundo Krautkrämer e Krautkrämer (1990) o coeficiente de atenuação total da onda ultra-sônica pode ser definido como:

$$\epsilon_T = \epsilon_v + \epsilon_D . \quad (2.15)$$

Na literatura encontram-se vários estudos da aplicação de técnicas ultra-sônicas em escoamentos bifásicos, porém há poucas informações sobre a influência do material do tubo e a geração de ruídos. Morala et al. (1984) trabalharam com colunas de borbulhamento em polietileno e alumínio, Chang et al. (1984) trabalharam com colunas de borbulhamento, porém no artigo não foi mencionado o material das mesmas, Stravs e Stockar (1985b) trabalharam com coluna de borbulhamento em acrílico, Chang e Morala (1990) trabalharam com uma coluna de borbulhamento e escoamento bifásico em tubo horizontal, ambos fabricados em alumínio, Filho (2004) trabalhou com uma coluna de borbulhamento em acrílico e Wada et al. (2006) trabalharam com escoamento vertical utilizando tubos de acrílico e aço carbono. Nestes

trabalhos não foram informados o efeito da interação do campo ultra-sônico com as paredes do tubo e a qualidade do sinal ultra-sônico obtido.

Segundo Krautkrämer e Krautkrämer (1990) nos materiais poliméricos como acrílico e polietileno a atenuação da onda ultra-sônica ocorre predominantemente por absorção e como praticamente não ocorre espalhamento, a ocorrência de ruídos é mínima. A aplicação da técnica ultra-sônica em colunas ou tubos de material polimérico apresenta ecogramas com baixos valores da amplitude dos ruídos, pois conforme descrito, o sinal não sofre interferência de ondas originadas por múltiplas reflexões e espalhamento, em razão da forte atenuação.

A atenuação da onda ultra-sônica ocorre por absorção e espalhamento, conforme equação 2.15. Nos metais policristalinos, onde a relação entre o comprimento da onda ultra-sônica e o diâmetro do grão é maior que a unidade (espalhamento de Rayleigh) a equação 2.15 passa a ser escrita como:

$$\epsilon_T = B_1 (f) + B_2 (\Psi)^3 (f)^4 \quad (2.16)$$

O primeiro termo da equação está relacionado com a perda de energia por absorção, onde B_1 é uma constante relacionada à histerese elástica do material, e assim, observa-se que a atenuação ocorre linearmente com a frequência. O segundo termo está relacionado com o coeficiente de espalhamento B_2 , diâmetro médio do grão Ψ a terceira potência e a frequência f a quarta potência. Em relação ao tratamento dos sinais, o que causa maiores problemas é o aparecimento de ruídos decorrentes da propagação da onda ultra-sônica na parede do tubo. Desta equação, o coeficiente de espalhamento é o parâmetro que apresenta maior influência na análise dos sinais, pois a aparecimento de ruídos é fortemente influenciado pelo espalhamento das ondas ultra-sônicas. Segundo Papadakis (1965a) o alumínio apresenta coeficiente de espalhamento para ondas longitudinais igual $4,6MHz.cm^{-4}$ e o ferro $80,6MHz.cm^{-4}$. Esses valores possibilitam observar que o coeficiente de espalhamento do alumínio é baixo e, portanto, os sinais obtidos pela aplicação da técnica ultra-sônica em colunas ou tubos utilizando esse material não sofrem grande influência de ondas originadas por múltiplas reflexões e espalhamento, ao contrário do que ocorre nas ligas de aço.

Entre os materiais encontrados na literatura e na indústria sendo aplicados

em escoamentos bifásicos utilizando a técnica ultra-sônica, o aço carbono e o aço inoxidável são os que apresentam maiores coeficientes de espalhamento, o que torna a análise dos sinais ultra-sônicos mais difícil, sendo necessários estudos para superar essa dificuldade, uma vez que em reatores nucleares os tubos de aço inoxidável são os materiais comumente utilizados.

A aplicação da técnica ultra-sônica pulso-eco em colunas de borbulhamento ou tubos, onde os materiais utilizados são aço carbono ou aço inoxidável, requer que o transdutor utilizado apresente alta frequência para evitar o aparecimento de ruídos.

Wada et al. (2006) utilizaram em seus experimentos aço carbono no escoamento bifásico vertical, não tendo problemas de ruídos na análise dos sinais em razão de terem utilizado o transdutor ultra-sônico com ângulo de incidência igual a 19° em relação a superfície do tubo, garantindo assim que somente ondas ultra-sônicas transversais fossem transmitidas do transdutor para o tubo. Isso favoreceu o não aparecimento de múltiplas reflexões uma vez que, devido a inclinação do transdutor, as múltiplas reflexões se propagaram no sentido longitudinal do tubo, distanciando-se do transdutor. O inconveniente da técnica utilizada é a dificuldade no posicionamento do transdutor para se obter o exato ângulo de inclinação, além de se utilizar água, o que necessita da montagem de um sistema que envolva o tubo externamente com água.

Pressão Acústica

Embora a intensidade acústica seja uma grandeza importante no estudo do campo ultra-sônico, a grandeza de maior importância é a pressão acústica, em razão das suas variações ao interagir com interfaces dispersas no meio líquido.

De acordo com o princípio de propagação das ondas acústicas, a perturbação no meio sofrida pelas partículas da substância quando sujeitas a uma força externa, provoca seu deslocamento em relação às suas posições de equilíbrio, tendo como decorrência variações na pressão. A pressão de uma onda acústica, plana ou esférica, na máxima amplitude de oscilação é expressa pela equação (Gómez et al., 1980, Urick, 1967):

$$P_a = \rho C v_0 . \quad (2.17)$$

Portanto, de acordo com a equação 2.13, a relação entre intensidade e pressão acústica é dada pela equação:

$$I = \frac{1}{2} \frac{P_a^2}{Z}. \quad (2.18)$$

Para sinais transientes, quando ocorre considerável distorção de sinal ou incidência das ondas sobre descontinuidades no meio, é usual a utilização da densidade do fluxo de energia expresso por Urick (1967):

$$E_f = \int_0^\infty I dt. \quad (2.19)$$

Reflexão e Transmissão de Ondas

A velocidade de propagação de uma onda acústica depende das propriedades físicas do meio através do qual ela se propaga. Fenômenos de reflexão e refração ou transmissão ocorrem quando uma onda acústica incide sobre uma superfície de separação entre meios de propriedades acústicas diferentes. Parte da energia da onda acústica incidente é refletida, retornando ao meio inicial de propagação, e parte é transmitida ao segundo meio. A figura 2.7 mostra a representação da reflexão e transmissão da onda acústica incidente sobre uma interface de dois meios de diferentes impedâncias acústicas.

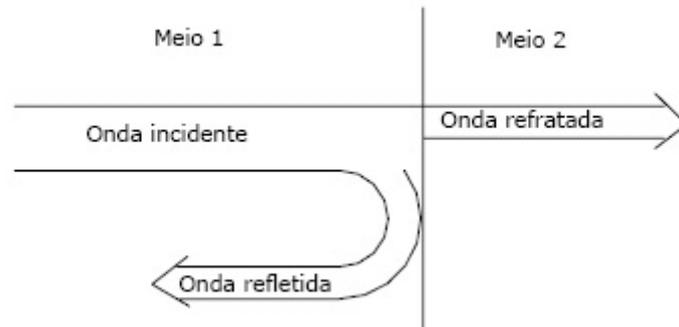


Figura 2.7: Reflexão e transmissão da onda acústica.

A quantidade das energias acústicas, refletida e transmitida em uma interface, depende da razão entre suas impedâncias acústicas (Z_2/Z_1) e dos ângulos de incidência e refração. A figura 2.8 apresenta a representação esquemática das ondas acústicas incidente, refletida, refratada e seus respectivos ângulos.

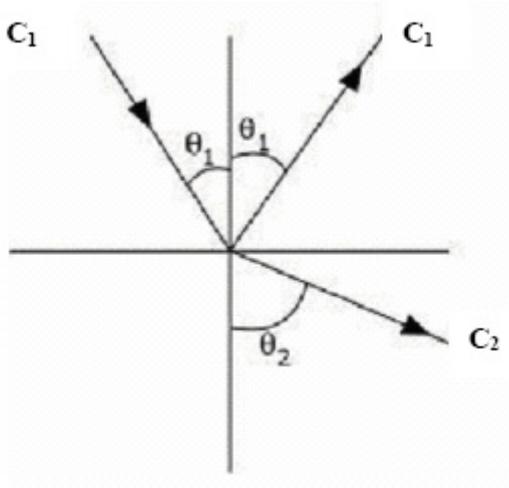


Figura 2.8: Lei de Snell.

A relação entre as velocidades e ângulos de propagação das ondas acústicas obedece a Lei de Snell, sendo expressa pela equação:

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2}, \quad (2.20)$$

onde:

- θ_1 é o ângulo incidente,
- θ_2 é o ângulo refratado,
- C_1 é a velocidade da onda no meio 1,
- C_2 é a velocidade da onda no meio 2.

De acordo com a equação 2.11 a equação 2.20 pode ser expressa como:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2}, \quad (2.21)$$

Coeficientes de Reflexão e Transmissão de Ondas

Os coeficientes de reflexão R_I e transmissão T_I da intensidade acústica, são definidos respectivamente como (Krautkrämer e Krautkrämer, 1990, Kuttruff, 1991):

$$R_I = \frac{I_{re}}{I_{in}} = \frac{(Z_2 \cos \theta_1 - Z_1 \cos \theta_2)^2}{(Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2)^2}, \quad (2.22)$$

$$T_I = \frac{I_{tr}}{I_{in}} = \frac{4Z_1 \cos \theta_2 Z_2 \cos \theta_1}{(Z_1 \cos \theta_2 + Z_2 \cos \theta_1)^2}. \quad (2.23)$$

Das equações anteriores observa-se que os valores de R_I e T_I são indiferentes ao sentido de propagação da onda, podendo-se permutar os valores das impedâncias acústicas sem que ocorra alterações dos coeficientes.

O mesmo não ocorre com os coeficientes de reflexão e transmissão da pressão acústica R_p e T_p , que são definidos como (Gómez et al., 1980, Krautkrämer e Krautkrämer, 1990):

$$R_p = \frac{P_{re}}{P_{in}} = \sqrt{R_I} = \frac{Z_2 \cos \theta_1 - Z_1 \cos \theta_2}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2}, \quad (2.24)$$

$$T_p = \frac{P_{tr}}{P_{in}} = \sqrt{T} \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{2Z_2 \cos \theta_1}{Z_2 \cos \theta_1 + Z_1 \cos \theta_2}. \quad (2.25)$$

Na equação 2.24 observa-se que quando a impedância acústica do segundo meio Z_2 for maior que a do primeiro Z_1 o resultado será positivo, indicando que a onda incidente e a refletida estão na mesma fase, em caso contrário $Z_1 > Z_2$, o valor negativo indica que há uma reversão de fase entre a onda refletida e a incidente. A figura 2.9 mostra a reversão de fase da onda acústica ao se propagar de um meio de maior impedância acústica, aço, para outro de menos impedância acústica água. As reflexões múltiplas na espessura da parede do tubo, próximo ao transdutor, são compostas por ondas acústicas que alternam mudanças de fases ($Z_{aço} > Z_{água}$), ocasionando interferências construtivas e destrutivas nos pulsos ultra-sônicos gerados pelo transdutor (Filho et al., 2008, Lamy et al., 2007a). Conforme experimentos a serem apresentados no capítulo 3, observa-se que esse fenômeno contribui para o aumento da amplitude de ruídos e a formação de complexos grupos de onda.

Da equação 2.25 observa-se que quando a impedância acústica do segundo meio Z_2 for maior que a do primeiro Z_1 o resultado será maior que a unidade, o que indica que a amplitude da onda transmitida será maior do que o da onda incidente $T_p > 1$, em caso contrário $Z_1 > Z_2$, o valor menor que a unidade indica que a amplitude da onda transmitida será menor. A figura 2.10 mostra a não ocorrência da mudança

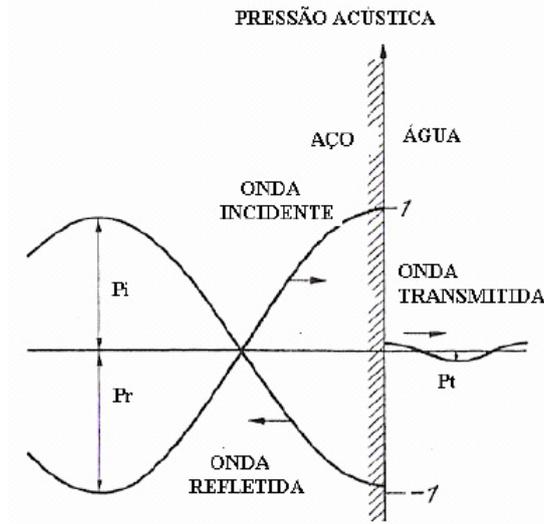


Figura 2.9: Reversão de fase.

de fase da onda refletida em razão da maior impedância acústica do segundo meio e permite uma comparação entre as intensidades das amplitudes das ondas incidente, refletida e transmitida.

Normalmente os transdutores são acoplados perpendicularmente a superfície do tubo, assim o ângulo de incidência é igual a zero e as equações 2.24 e 2.25 são simplificadas tornando a função cosseno igual a unidade.

Quando uma onda acústica incide normalmente à superfície da interface, ela é transmitida em forma exclusiva de onda longitudinal (Chang e Morala, 1990). Os coeficientes de reflexão e transmissão dependem do sentido da trajetória de propagação da onda, por exemplo, se a onda se propagar na água, cuja impedância acústica é $Z_1 = 1,49 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2\text{s}$, e incidir sobre uma bolha de ar, cuja impedância acústica é $Z_2 = 0,004 \times 10^6 \text{ Kg/m}^2\text{s}$ a 4°C , das equações 2.24 e 2.25, obtém-se $R_P = -0,9946$ e $T_P = 0,0054$. Estes valores, em termos percentuais, indicam que, da pressão acústica incidente; 99,46% retornam a água e 0,54% é transmitida para o ar. O valor negativo $-0,995\%$ indica ocorrência de reversão de fase.

A tabela 2.3 apresenta coeficientes de reflexão e transmissão da pressão acústica, com ângulo de incidência igual a zero e ondas acústicas longitudinais de acordo com o sentido de propagação.

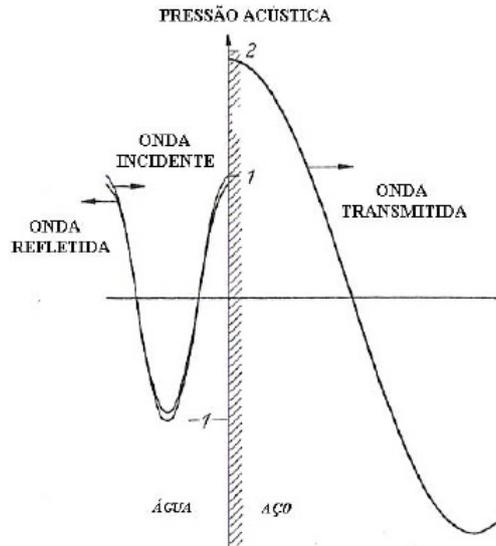


Figura 2.10: Transmissão da onda.

2.2 Fundamentos de Escoamentos Bifásicos

Escoamentos bifásicos em tubulações horizontais e pouco inclinadas são largamente encontrados nas indústrias, envolvendo diversos parâmetros e fenômenos físicos que necessitam ser quantificados e controlados a fim de se alcançar projetos econômicos de processos e garantir a eficiência e segurança operacional dos equipamentos. Nesta seção serão apresentados conceitos relacionados ao escoamento bifásico e revisão da literatura.

2.2.1 Fração das Fases

As frações das fases, isto é as frações do volume ou da seção transversal ocupada por uma dada fase no escoamento bifásico são parâmetros importantes a serem monitorados e controlados. Segundo Todreas e Kazimi (1990), fração do volume de controle V que é ocupada pela fase k num dado instante pode ser expressa por:

$$\langle \alpha_k \rangle = \frac{1}{V} \iiint \alpha_k dV = \frac{V_k}{V} = \frac{V_k}{V_k + V_{k'}}. \quad (2.26)$$

O subscrito K e a representação simbólica da fase, quando a fase K é um gás a fração volumétrica é normalmente denominada de fração de vazio, (*void fraction*)

Tabela 2.3: Coeficientes de reflexão e transmissão.

Sentido de propagação da onda acústica	Coeficiente de reflexão (R_p) (%)	Coeficiente de transmissão (T_p) (%)
Aço inoxidável / Água	-93,66	6,34
Acrílico / Água	-36,46	63,54
Alumínio / Água	-84,06	15,94
Aço / Ar	-99,99	0,01
Acrílico / Ar	-99,79	0,21
Alumínio / Ar	-99,96	0,04
Água / Ar	-99,46	0,54
Água / Aço inoxidável	93,66	193,66
Água / Acrílico	36,46	136,46
Água / Alumínio	84,06	184,06
Ar / Aço inoxidável	99,99	199,99
Ar / Água	99,46	199,46

α_G . Já quando a fase é um líquido é normalmente denominada de fração de líquido e algumas vezes é denominada (*holdup*) α_L .

Em relação às áreas das seções transversais ocupadas por uma determinada fase, as frações de vazio α_G e de líquido α_L são definidas pelas expressões:

$$\alpha_G = \frac{A_G}{A_T} = \frac{A_G}{A_G + A_L}, \quad (2.27)$$

$$\alpha_L = \frac{A_L}{A_T} = \frac{A_L}{A_G + A_L}, \quad (2.28)$$

onde:

- A_G é a área da seção transversal ocupada pela fase gás,
- A_L é a área da seção transversal ocupada pela fase líquida,
- A_T é a área total da seção transversal do tubo.

2.2.2 Fração Volumétrica ou Fração de Descarga

A fração de descarga λ_K da fase escoando através do tubo é definida como a razão entre a vazão volumétrica de uma fase e a vazão volumétrica total.

$$\lambda_G = \frac{Q_G}{Q_T} = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L}, \quad (2.29)$$

$$\lambda_L = \frac{Q_L}{Q_T} = \frac{Q_L}{Q_G + Q_L}. \quad (2.30)$$

2.2.3 Velocidade Superficial da Fase

A velocidade superficial da fase U_{KS} é definida como a razão entre a vazão volumétrica fase K (Q_K) e a área total da seção transversal do tubo (A_T).

$$U_{KS} = \frac{Q_K}{A_T}. \quad (2.31)$$

As velocidades superficiais das fases gás (U_{GS}) e líquido (U_{LS}) correspondem as velocidades que as fases exibiriam se estivessem escoando sozinhas através da área da seção transversal do tubo. Aparecem como variáveis nos eixos coordenados de vários mapas de escoamento.

2.2.4 Velocidade da Mistura

No escoamento bifásico gás-líquido a velocidade da mistura U_M é definida como a soma das velocidades superficiais das fases:

$$U_M = U_{GS} + U_{LS} = \frac{Q_G + Q_L}{A_T}. \quad (2.32)$$

2.2.5 Velocidade da Fase

A velocidade da fase U_K é definida como a razão entre a vazão volumétrica de cada fase K (Q_K) e a área da seção transversal ocupada por cada fase no tubo (A_K).

$$U_K = \frac{Q_K}{A_K}. \quad (2.33)$$

A relação entre a velocidade superficial e a velocidade da fase são definidas pelas expressões:

$$U_{GS} = U_G \alpha_G, \quad (2.34)$$

$$U_{LS} = U_L \alpha_L. \quad (2.35)$$

2.2.6 Razão de Deslizamento ou Escorregamento

Quando em um escoamento, duas fases diferem uma da outra em densidade e ou viscosidade, uma delas tende a escoar com velocidade mais elevada que a outra. Isto gera no fluxo uma importante característica de deslizamento de uma fase sobre a outra.

A razão de deslizamento, S (*slip ration*), é definida como a razão entre a velocidade da fase gás (U_G) e a velocidade da fase líquida (U_L).

$$S = \frac{U_G}{U_L} = \frac{U_{GS}}{\alpha_G} \frac{\alpha_L}{U_{LS}}. \quad (2.36)$$

2.2.7 Velocidade Relativa

A velocidade relativa U_{Rel} é definida como a diferença entre as velocidades da fase gás e líquido, ou seja, a velocidade relativa da fase gás em relação a fase líquida.

$$U_{Rel} = U_G - U_L = \frac{U_{GS}}{\alpha_G} - \frac{U_{GL}}{\alpha_L}. \quad (2.37)$$

2.2.8 Velocidade de Arraste

A velocidade de arraste, *Drift Velocity* – U_{GU} , é definida como a diferença entre a velocidade da fase gás e a velocidade do centro no volume da mistura. A velocidade de deslizamento representa uma grandeza relativa ao desvio da velocidade da fase em relação a velocidade da mistura U_M .

$$U_{GU} = U_G - U_M = U_{Rel} \alpha_G \alpha_L. \quad (2.38)$$

Para a condição de escoamento onde são adotadas as médias através da seção transversal do tubo, a equação 2.38, modificada, passa a ser expressa por:

$$\overline{U}_G = \overline{U}_M + \overline{U}_{GU}. \quad (2.39)$$

O símbolo barra sobre a variável (\bar{U}) significa variável local integrada em toda área transversal ao escoamento, representando valor médio simples. A velocidade da fase gás, presente na equação 2.39, pode ser representada como uma média ponderada em relação a média local da fração de vazio na seção transversal ao escoamento (*Weighted Mean Velocity*) \bar{U}_G .

$$\bar{U}_G = \frac{\langle U_G \alpha_G \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} = \frac{\langle U_{GS} \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} = \frac{\langle U_M \alpha_G \rangle}{\langle \alpha_G \rangle} + \frac{\langle U_{GU} \alpha_G \rangle}{\langle \alpha_G \rangle}. \quad (2.40)$$

Segundo Todreas e Kazimi (1990), o produto das médias no tempo da fração de vazio local pela velocidade local de arraste é denominada *Fluxo Deslizante*–(*Drift Flux*).

$$U_{GL} = \overline{\alpha_G U_{GU}}. \quad (2.41)$$

Fisicamente o fluxo deslizante U_{GL} representa a taxa volumétrica da fase gás que escoa através de um plano unitário e normal ao eixo do tubo, onde o mesmo viaja com o escoamento na velocidade da mistura U_M . Desse modo a velocidade da mistura permanece como um parâmetro local.

Substituindo as equações 2.34 e 2.38 na equação 2.41, o fluxo deslizante também pode ser expresso por:

$$U_{GL} = \alpha_L U_{GS} - \alpha_G U_{LS}. \quad (2.42)$$

Um parâmetro empírico relativo a distribuição do perfil de velocidade no escoamento bifásico é o coeficiente C_0 que reflete a distribuição das fases na seção transversal da tubulação:

$$C_0 = \frac{\overline{\alpha_G U_M}}{\overline{\alpha_G} \overline{U_M}} = \frac{\int \alpha_G U_M dA}{[\int U_M dA] \frac{1}{A_T} \int \alpha_G dA}. \quad (2.43)$$

Esta razão considera o desvio entre a média do produto das variáveis, fração de vazio e velocidade da mistura, e o produto dos valores médios dessas variáveis.

A equação 2.40 pode ser modificada para as seguintes expressões:

$$\overline{U_G} = C_0 \overline{U_M} + \frac{\overline{U_{GL}}}{\overline{\alpha_G}}, \quad (2.44)$$

$$\overline{U_{GS}} = C_0 \overline{\alpha_G} \overline{U_M} + \overline{\alpha_G} \langle U_{GU} \rangle, \quad (2.45)$$

$$\overline{\alpha_G} = \frac{\overline{U_{GS}}}{C_0 \overline{U_M} + \langle U_{GU} \rangle} = \frac{\overline{\lambda_G}}{C_0 + \frac{\langle U_{GU} \rangle}{\overline{U_M}}}, \quad (2.46)$$

$$\frac{\overline{U_G}}{\overline{U_M}} = \frac{\overline{\lambda_G}}{\overline{\alpha_G}} = C_0 + \frac{\langle U_{GU} \rangle}{\overline{U_M}}. \quad (2.47)$$

Onde:

- λ_G é a fração volumétrica definida conforme equação 2.29, observando neste caso a relação entre as velocidades superficial do gás e a da mistura:

$$\overline{\lambda_G} = \frac{U_{GS}}{U_M} = \frac{U_{GS}}{U_{GS} + U_{LS}} = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L}. \quad (2.48)$$

- Para o caso de não haver movimento relativo entre as fases $S = 1$, ($U_{GU} = 0$), então:

$$\overline{\alpha_G} = \frac{\overline{\lambda_G}}{C_0}. \quad (2.49)$$

Então, sendo C_0 um fator empírico que corrige a teoria do escoamento homogêneo, leva em consideração que a fração de vazio e os perfis de velocidade através do tubo podem variar independentemente entre eles. Então para o escoamento homogêneo $C_0 = 1$ e $\overline{\alpha_G} = \overline{\lambda_G}$

- Não sendo analisado o modelo do deslizamento entre as fases, *Drift Flux*, a fração de vazio local média na seção transversal do tubo será escrita simplesmente como α_G .

2.2.9 Equações da Conservação em um Escoamento Bifásico Unidimensional

A equação relativa a conservação da massa para um escoamento bifásico unidimensional através de um tubo, sem adição ou remoção de massa pela parede do tubo, para um escoamento bifásico conforme a figura 2.11, é expressa, conforme Collier e Thome (1996), Todreas e Kazimi (1990), por:

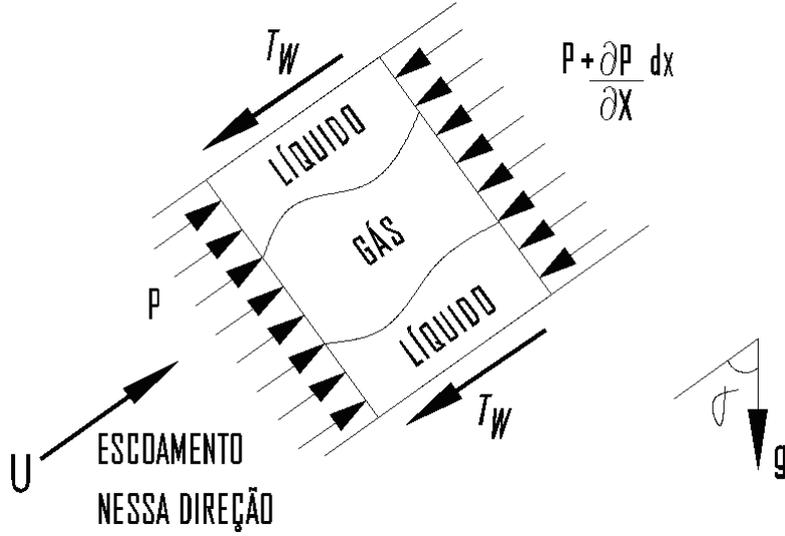


Figura 2.11: Escoamento bifásico em um tubo.

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L) A_T}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G \alpha_G U_{GS} + \rho_L \alpha_L U_{LS}) A_T}{\partial x} = 0. \quad (2.50)$$

onde:

- ρ_G é a densidade da fase gás,
- ρ_L é a densidade da fase líquida,
- U_{GS} é a velocidade superficial da fase gás,
- U_{LS} é a velocidade superficial da fase líquido.

Segundo Todreas e Kazimi (1990), uma mistura bifásica escoando ao longo de um tubo de seção transversal constante apresenta a equação da conservação do momento expressa por:

$$\frac{\partial(\rho_G \alpha_G U_{GS} + \rho_L \alpha_L U_{LS}) A_T}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_G \alpha_G U_{GS}^2 + \rho_L \alpha_L U_{LS}^2) A_T}{\partial x} = -A_T \frac{dP}{dx} - \int_{P_x} \tau_W dP_x - (\rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L) g \cos \gamma A_T, \quad (2.51)$$

onde:

- τ_W é a tensão de cisalhamento entre as fases e a parede do tubo e na interface das fases,
- P é a pressão ao longo da direção x, e
- γ é o ângulo entre eixo do tubo e a direção vertical.

Em razão do escoamento no tubo ser permanente e o sistema gás-líquido estar em equilíbrio, a equação de balanço do momento passa a ser expressa por:

$$-\frac{\partial PA_T}{\partial x} - \int_{P_x} \tau_W dPx - (\rho_G \alpha_G + \rho_L \alpha_L) g \cos \gamma A_T = 0, \quad (2.52)$$

A equação 2.52 representa o balanço entre forças devido a queda de pressão, forças interfaciais de arrasto, forças resistivas ao escoamento devido ao atrito das fases com a parede do tubo e força gravitacional.

2.2.10 Número de Froude

O número de Froude é um número adimensional que relaciona o efeito das forças de inércia com as forças de gravidade que atuam no fluido, sendo expresso por:

$$Fr = \frac{U_M^2}{gDi} = \frac{(U_{GS} + U_{LS})^2}{gDi}. \quad (2.53)$$

Petalas e Aziz (1998) desenvolveram um modelo mecanicista para cálculo de parâmetros bifásicos onde propuseram um número de Froude modificado denominado número de Froude densimétrico expresso pelas equações a seguir:

$$Fr_{dG} = \left(\frac{\rho_G}{\Delta \rho D_i g} \right)^{0,5} U_{SG}, \quad (2.54)$$

$$Fr_{dL} = \left(\frac{\rho_L}{\Delta \rho D_i g} \right)^{0,5} U_{SL}. \quad (2.55)$$

onde:

- Fr_{dG} é o número de Froude densimétrico da fase gás,
- Fr_{dL} é o número de Froude densimétrico da fase líquido.

2.2.11 Padrões de Escoamento

Existem diferentes métodos para reconhecimento dos padrões de escoamentos bifásicos. A técnica mais comum e simples é a observação visual diretamente do escoamento através de tubo transparente ou visor. Frequentemente nesses estudos são utilizadas técnicas visuais utilizando-se equipamentos fotográficos ou vídeos de alta velocidade. O maior problema dessas técnicas é que a observação e interpretação são altamente subjetivas, especialmente em altas velocidades da fase gás, onde os parâmetros de escoamento como ondas as interfaces se movem ao longo do tubo a elevadas velocidades. Diferenças na interpretação das observações visuais são, sem dúvida, a principal razão para que os experimentos apresentem diferentes registros dos padrões de escoamento para condições essencialmente similares. Um dos fatores importantes na aplicação da técnica de visualização, fotográfica ou vídeo, é o ajuste da intensidade de iluminação e problemas decorrentes de reflexões que ocorrem na superfície do tubo transparente e nas interfaces das fases, induzindo a diferentes interpretações.

Tipos de Padrões de Escoamento

Escoamento em bolhas (*Bubbly flow*) Este padrão está enquadrado dentro dos escoamentos chamados dispersos. Nesta configuração as bolhas tendem a escoar na parte superior do tubo uma vez que a fase dispersa é menos densa do que a contínua. Estas bolhas podem se apresentar na forma esférica em pequenos diâmetros ou em tamanhos maiores com formas elípticas alongadas. Quando a velocidade do líquido aumenta o escoamento tende a se tornar mais disperso e com bolhas menores. (Figura ??).

Escoamento pistonado (*Plug flow*) À medida que a velocidade da fase gás aumenta, ocorre o coalescimento das bolhas, formando bolhas maiores e alongadas. Devido a diferença de velocidade das fases ocorre a formação de pistões (*plugs*) de líquido, também chamados na literatura de slugs de líquido. As bolhas tendem a escoar pela metade superior do conduto. Neste caso, esta condição assimétrica é mantida independentemente da velocidade de escoamento.

mento, devido ao maior tamanho das bolhas (Figura ??).

Escoamento estratificado liso (*Stratified Smooth Flow*) Acontece em velocidades muito baixas de líquido e gás. As duas fases são separadas por uma interface lisa, sem ondulações (Figura ??).

Escoamento estratificado ondulado (*Wavy flow*) Quando no escoamento estratificado a velocidade do gás aumenta, aparecem oscilações na interface, ou seja, surgem ondas que não chegam a tocar na superfície superior do tubo. O padrão e amplitude da onda varia com as variações das vazões das fases gás e líquido e com as propriedades físicas do fluido como a densidade e tensão superficial (Figura ??).

Escoamento slug (*Slug flow*) É similar ao escoamento pistonado, porém como a velocidade do gás é maior do que à velocidade do líquido formam-se ondas (“*slugs*” de líquido) maiores que periodicamente molham a parede superior do tubo, gerando grandes bolhas de gás presas entre duas ondas. Pequenas bolhas de gás misturam-se a fase líquida tornando-a altamente aerada. Este escoamento é caótico uma vez que os pistões de líquido (“*slugs*” de líquido) são intermitentes e não periódicos (Figura ??).

Escoamento anular (*Annular flow*) Aumentando-se ainda mais a velocidade do gás, haverá concentração do gás ao centro do tubo com a formação de uma camada de líquido totalmente em contato com a parede do tubo. A camada de líquido é geralmente muito mais espessa na parte inferior do tubo devido à ação da gravidade. A fase gás esco a alta velocidade e frequentemente apresenta quantidade significativa de gotículas líquidas dispersas (Figura 2.12).

A figura ?? apresenta uma representação esquemática dos padrões de escoamento descritos acima.

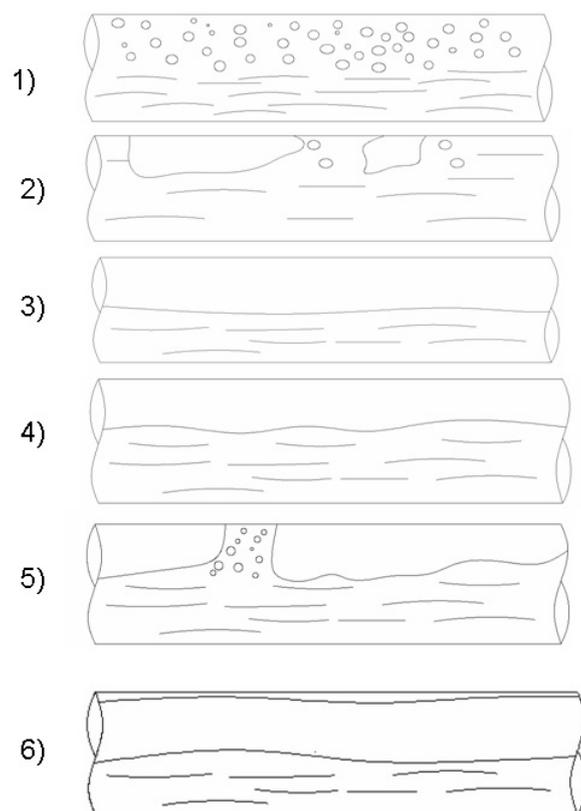


Figura 2.12: Padrões de escoamento horizontal- 1) Em bolhas, 2) Pistonado, 3) Estratificado lico 4) Estratificado ondulado 5) Slug 6) Anular.

Mapas Empíricos de Padrões de Escoamento

Nesta seção será feita uma revisão de mapas empíricos de padrões de escoamento bifásico ar-água em tubulação horizontal de seção transversal circular.

Um grande número de dados relativos aos padrões de escoamentos, predominantemente ar-água, são encontrados na literatura. Obviamente existe uma necessidade em generalizar os dados disponíveis a fim de cobrir uma larga faixa de parâmetros como as propriedades dos fluidos, dimensão da tubulação e das condições de operação. Baker (1954) reconheceu a importância dos padrões de escoamento como ponto inicial para cálculo de perda de carga, fração volumétrica e transferência de calor e massa, propondo um mapa com padrão de escoamento generalizado para o escoamento horizontal.

Mapas empíricos típicos de padrões de escoamento são constituídos a partir de

dados experimentais, onde nos eixos coordenados são utilizados grupos adimensionais, velocidades superficiais das fases, fluxos de massa ou momento. Nestes mapas os diferentes padrões de escoamento bifásico são apresentados na forma de regiões divididas por linhas de transição. Estas linhas representam fronteiras de regiões nas quais à ocorrência de um padrão específico de escoamento é observada. Devido às interfaces transientes nos escoamentos bifásicos a precisão na determinação das linhas de transição é dependente do número de experimentos executados e dos parâmetros utilizadas nos eixos coordenados do mapa. Também as diferentes classificações dos padrões de escoamento e os diferentes nomes atribuídos por diferentes autores dificultam ainda mais o estudo e comparação entre linhas de transição.

No mapa de Baker (1954) as fronteiras dos vários padrões de escoamento são mostradas como funções da vazão mássica da fase gás, $G_G = \rho_G U_{GS}$, e da razão entre as vazões mássicas das fases líquido e gás, $(G_L/G_G) = (\rho_L U_{LS} / \rho_G U_{GS})$, sendo acrescidos de fatores de correção, $FC1$ e $FC2$, que levam em consideração as propriedades dos fluidos, sendo estes definidos através das equações 2.56 e 2.57.

$$FC1 = \left[\left(\frac{\rho_G}{\rho_A} \right) \left(\frac{\rho_L}{\rho_W} \right) \right]^{0,5}, \quad (2.56)$$

$$FC2 = \frac{\sigma_{AW}}{\sigma_{GL}} \left[\left(\frac{\mu_L}{\mu_W} \right) \left(\frac{\rho_W}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1/3}, \quad (2.57)$$

onde ρ , σ e μ representam respectivamente a densidade, tensão superficial e viscosidade dos fluidos.

O mapa foi construindo com base no escoamento bifásico ar-água na pressão de 1 atm e tendo como valores referenciais:

- $\sigma_{AW} = 0,073 N/m$ é o valor utilizado para tensão superficial ar-água,
- $\mu_W = 1,0 \times 10^{-3} Ns/m^2$ é o valor utilizado para viscosidade da água,
- $\rho_W = 997,9 kg/m^3$ é o valor utilizado para densidade da água,
- $\rho_A = 1,201 kg/m^3$ é o valor utilizado para densidade do ar.

Então para um sistema bifásico ar-água na pressão de 1 atm os valores de $FC1$ e $FC2$ são iguais a 1, conseqüentemente para um sistema de propriedades constantes o mapa apresentará os eixos coordenados equivalentes a U_{GS} versus U_{LS}/U_{GS} , .

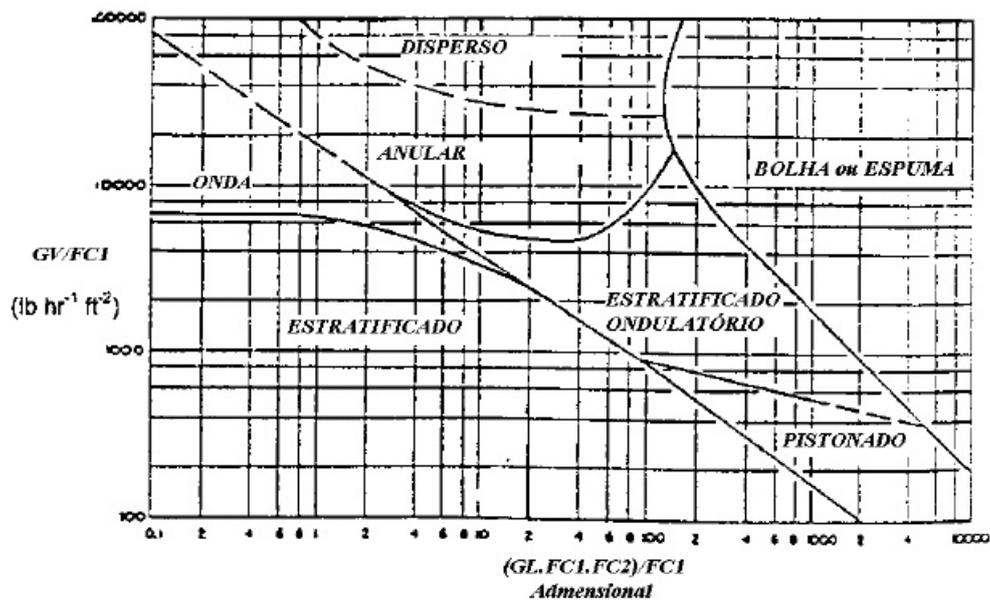


Figura 2.13: Mapa de Baker (1954).

Segundo Spedding e Spence (1993) este mapa foi construído com base nos experimentos realizados por Jenkis (1947), Gazley (1948), Alves (1954) e Kosterin (1949). A figura 2.13 apresenta o mapa de Baker.

Com a evolução dos estudos verificou-se que o mapa de Baker era deficiente para representar o efeito de diferentes condições de escoamento.

Beggs e Brill (1973) tentaram simplificar os limites de transição entre os padrões considerando somente três tipos de escoamento: segregado, intermitente e distribuído. Eles realizaram seus estudos em uma seção de testes, com tubos de diâmetros 27,4 mm e 38,1 mm, dotada de um sistema de inclinação que permitia variar o ângulo de -90° a 90° . Os escoamentos estratificado e anular foram agrupados como escoamento segregado, o pistonado e slug como escoamento intermitente e o em bolhas como distribuído. Os padrões de escoamento foram determinados com a tubulação na horizontal.

Utilizando essas classificações, os autores propuseram um gráfico totalmente adimensional, relacionando o Número de Froude Fr , equação 2.53, com a fração de descarga λ_L , equação 2.30. A fração de descarga é obtida pela equação 2.30 e o Número de Froude pela equação 2.53.

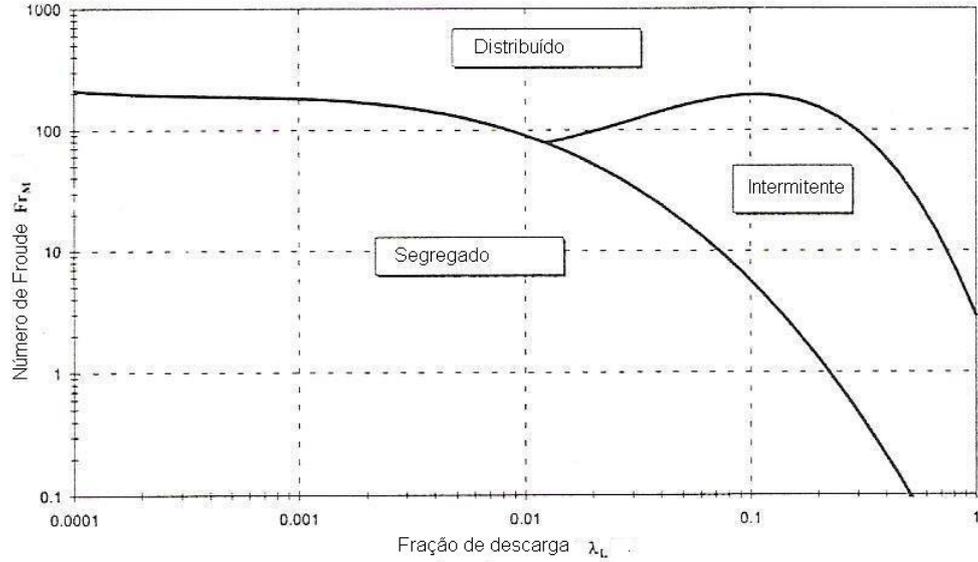


Figura 2.14: Mapa de Beggs e Brill (1973).

O mapa proposto por Beggs e Brill (1973) está representado na figura 2.14.

Para um sistema de propriedades físicas constantes, o mapa de Beggs e Brill é equivalente a construir um mapa de coordenadas $(U_{LS} + U_{GS})^2$ versus $U_{LS}/(U_{LS} + U_{GS})$.

Empregando um ajuste que melhor atendesse seus dados experimentais, eles sugeriram que as linhas de transição entre os padrões de escoamento poderiam ser obtidas empregando as correlações:

$$L_1 = 316\lambda_L^{0,302}, \quad (2.58)$$

$$L_2 = 0,0009252\lambda_L^{-2,4684}, \quad (2.59)$$

$$L_3 = 0,10\lambda_L^{-1,4516}, \quad (2.60)$$

$$L_4 = 0,5\lambda_L^{-6,738}. \quad (2.61)$$

Os tipos de padrões são definidos através dos valores de λ_L e Fr :

- *Segregado*

- $\lambda_L < 0,01$ e $Fr < L_1$,
- $\lambda_L \geq 0,01$ e $Fr < L_2$.

- *Intermitente*

- $0,01 \leq \lambda_L < 0,4$ e $L_3 < Fr \leq L_1$,

- $\lambda_L \geq 0,4$ e $L_3 < Fr \leq L_4$.

- *Distribuído*

- $\lambda_L < 0,4$ e $Fr \geq L_1$,

- $\lambda_L \geq 0,4$ e $Fr > L_4$.

Beggs e Brill (1973) propuseram as seguintes correlações para determinação da fração de líquido α_L :

$$\alpha_L = \alpha_{LHor} \psi_{BB}, \quad (2.62)$$

Onde:

- Para o escoamento horizontal

$$\alpha_L = \alpha_{LHor}, \quad (2.63)$$

- Para o escoamento inclinado

$$\alpha_{LHor} = a \lambda_L^b \frac{a \lambda_L^b}{Fr^c}, \quad (2.64)$$

$$\psi_{BB} = 1 + C_{BB} [\sin 1, 8\beta - 0, 333 \sin^3 1, 8\beta], \quad (2.65)$$

$$C_{BB} = (1 - \lambda_L) \ln \left(d \lambda_L^e N_{Lv}^f Fr^g \right), \quad (2.66)$$

$$N_{Lv} = 1, 938 U_{LS} \left(\frac{\rho_L}{g\sigma} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (2.67)$$

Observações:

- β é o ângulo de inclinação do tubo
- $\alpha_{LHor} \geq \lambda_L$,
- C_{BB} é o coeficiente de Beggs & Brill - $C_{BB} \geq 0$ (se um valor negativo for obtido, considerar $C_{BB}=0$),
- ψ_{BB} é o fator de correção da fração de líquido (α_L) para diferentes ângulos de inclinação do tubo,

- as constantes a , b e c são relativas ao tipo de padrão de escoamento e estão apresentadas na tabela 2.4,
- as constantes d , e , f e g são relativas a equação 2.66 e estão apresentadas na tabela 2.5,
- No padrão de escoamento distribuído ascendente não se aplica os fatores de correção, portanto $C_{BB} = 0$, $\psi_{BB} = 1$,
- N_{Lv} é o número de velocidade do líquido.

Segundo Hale (2000) as linhas de transição entre os padrões de escoamento proposto por Beggs e Brill (1973) são expressas pelas equações:

- Transição do padrão segregado para o intermitente/distribuído:

$$L_{S-ID} = \exp^{-4,62-3,757 \ln \lambda_L-0,481(\ln \lambda_L)^2-0,0207(\ln \lambda_L)^3} \quad (2.68)$$

- Transição do padrão intermitente para o distribuído:

$$L_{I-D} = \exp^{1,061-4,602 \ln \lambda_L-1,609(\ln \lambda_L)^2-0,179(\ln \lambda_L)^3+0,653x10^{-3}(\ln \lambda_L)^5} . \quad (2.69)$$

Em razão das linhas terem tido um ajuste que melhor atendesse aos dados obtidos, as equações propostas por Beggs e Brill (1973) são bem aplicáveis para sistemas similares as condições do experimento. Em particular, o efeito de diferentes propriedades físicas não são considerados uma vez que, não se considera a densidade, viscosidade ou a tensão interfacial nestas correlações.

Tabela 2.4: Constantes relativas ao padrão de escoamento.

Padrão de escoamento	a	b	c
<i>Segregado</i>	0,980	0,4846	0,0868
<i>Intermitente</i>	0,845	0,5351	0,0173
<i>Distribudo</i>	1,065	0,5824	0,0609

Tabela 2.5: Constantes relativas ao fator C_{BB} .

Ângulo de inclinação β	Padrão de escoamento	d	e	f	g
<i>Ascendente</i> $\beta > 0$	Segregado	0,011	-3,7680	3,5390	-1,6140
<i>Ascendente</i> $\beta > 0$	Intermitente	2,960	0,305	-0,4473	0,0978
<i>Ascendente</i> $\beta > 0$	Distribuído	-	-	-	-
<i>Descendente</i> $\beta < 0$	Todos	4,700	-0,3692	0,1244	-0,5056

Um outro mapa é o mapa proposto por Mandhane et al. (1974) que validou um grande número de banco de dados, cobrindo uma grande faixa de condições operacionais, tendo sido largamente aceito e utilizado por vários pesquisadores. Utilizando dados de 5935 observações de padrões de escoamento, os autores classificaram em seis os padrões de escoamento: pistonado (*Plug - Bubble and elongated bubble flow*), escoamento slug (*slug flow*), escoamento anular (*annular and annular mist flow*), escoamento estratificado liso (*stratified flow*), escoamento estratificado ondulado (*wave flow*) e bolhas dispersas (*dispersed flow*). Para simplicidade construíram o mapa de padrão de escoamento relacionando as velocidades superficiais do gás e do líquido baseado em sistemas ar-água e subsequentemente foram aplicadas correções das propriedades físicas de outros fluidos.

O trabalho de Mandhane et al. (1974) embora seja uma aproximação correlacional, foi elaborado utilizando uma larga base de dados comparativamente maior do que Beggs e Brill (1973). Entretanto, uma vez que a maioria dos dados foram obtidos para o escoamento ar-água em tubos de 12,7 mm a 165,1 mm, a localização dos limites de transição será fortemente influenciada por esses sistemas. Apesar dessa limitação este mapa tornou-se mais simples de ser utilizado, bem como apresentou melhor concordância com os mapas existentes. Também apresenta melhor concordância com os dados disponíveis para escoamentos bifásicos ar-água. A figura 2.15 apresenta o mapa de Mandhane et al. (1974).

Segundo Hale (2000) as linhas de transição entre os diferentes padrões de escoamento do mapa de Mandhane et al. (1974), em unidades S.I., é dado por:

- Estratificado liso para o estratificado ondulado:

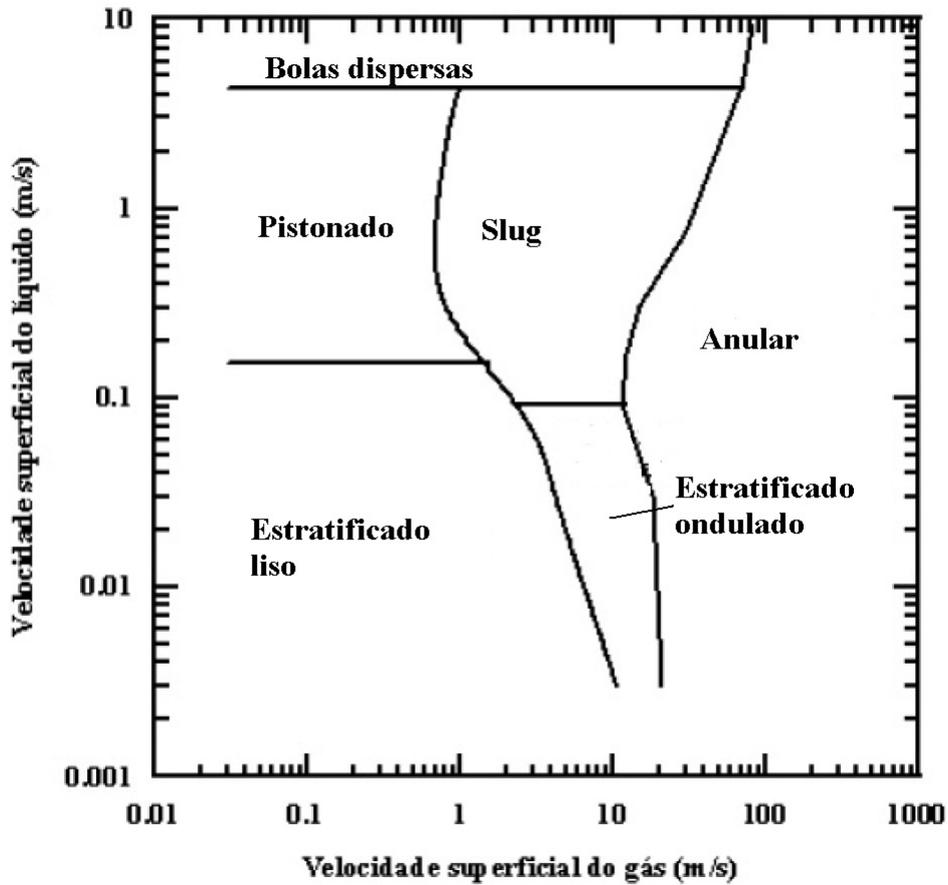


Figura 2.15: Mapa de Mandhane et al. (1974).

$$- U_{LS} \leq 0,03048$$

$$U_{GS} = 4,267X_{Mn} (32,81U_{LS})^{-0,368}, \quad (2.70)$$

$$- 0,03048 < U_{LS} \leq 0,06096$$

$$U_{GS} = 4,267X_{Mn} (32,81U_{LS})^{-0,415}, \quad (2.71)$$

$$- 0,06096 < U_{LS} \leq \frac{0,15239}{Y_{Mn}}$$

$$U_{GS} = 3,207X_{Mn} (16,405U_{LS})^{-0,816}. \quad (2.72)$$

- Estratificado liso para o pistonado:

$$- U_{GS} \leq 3,20024X_{Mn} \left(\frac{0,76196}{Y_{Mn}} \right)^{-0,816}$$

$$U_{LS} = \frac{0,15239}{Y_{Mn}}. \quad (2.73)$$

- Estratificado ondulado para o slug:

$$- 3,20024X_{Mn} \left(\frac{Y_{Mn}}{0,457} \right)^{-0,816} \leq U_{GS} \leq 11,58183X_{Mn} \left(\frac{Y_{Mn}}{3,281} \right)^{0,0813}$$

$$U_{LS} = 0,091Y_{Mn}. \quad (2.74)$$

- Estratificado ondulado para o anular:

$$- U_{LS} \leq 0,03048$$

$$U_{GS} = 21,335X_{Mn} (328,1U_{LS})^{-0,0675}. \quad (2.75)$$

$$- 0,03048 < U_{LS} \leq 0,09144$$

$$U_{GS} = 18,287X_{Mn} (32,81U_{LS})^{-0,415}. \quad (2.76)$$

- Slug para o pistonado:

$$- \frac{0,15239}{Y_{Mn}} < U_{LS} \leq 0,35050$$

$$U_{GS} = 3,200X_{Mn} (16,405U_{LS})^{-0,816}, \quad (2.77)$$

$$- 0,35050 < U_{LS} \leq 1,46297$$

$$U_{GS} = 0,762X_{Mn}, \quad (2.78)$$

$$- 1,46297 < U_{LS} \leq 4,26699Y_{Mn}$$

$$U_{GS} = 7,620X_{Mn} (0,684U_{LS})^{0,248}. \quad (2.79)$$

- Slug para o anular:

$$- 0,09143 < U_{LS} \leq 0,17068$$

$$U_{GS} = 11,582X_{Mn} (10,937U_{LS})^{0,813}, \quad (2.80)$$

$$- 0,17068 < U_{LS} \leq 0,30479$$

$$U_{GS} = 12,191X_{Mn} (5,859U_{LS})^{0,385}, \quad (2.81)$$

$$- 0,30479 < U_{LS} \leq 0,76196$$

$$U_{GS} = 15,239X_{Mn} (3,281U_{LS})^{0,756}. \quad (2.82)$$

$$- 0,76196 < U_{LS} \leq 4,26699Y_{Mn}$$

$$U_{GS} = 30,479X_{Mn} (1,312U_{LS})^{0,463}. \quad (2.83)$$

- Bolhas dispersas para o anular:

$$- U_{LS} \leq 4,26699Y_{Mn}$$

$$U_{GS} = 70,101X_{Mn} (0,234U_{LS})^{0,206}. \quad (2.84)$$

- Bolhas dispersas para o pistonado ou slug:

$$- U_{GS} \leq 30,47851X_{Mn} (1,707Y_{Mn})^{0,463}$$

$$U_{LS} = 4,267X_{Mn}. \quad (2.85)$$

onde:

$$X_{Mn} = \left(\frac{\rho_G}{\rho_A} \right)^{0,333} \left(\frac{\sigma_{AW}\rho_L}{\sigma\rho_W} \right)^{0,25} \left(\frac{\mu_G}{\mu_A} \right)^{0,2}, \quad (2.86)$$

$$Y_{Mn} = \left(\frac{\sigma_{AW}\rho_L}{\sigma\rho_W} \right)^{0,25} \left(\frac{\mu_L}{\mu_W} \right)^{0,2}. \quad (2.87)$$

Os valores referenciais utilizados foram:

- $\sigma_{AW} = 0,0724N/m$ é o valor utilizado para tensão superficial ar-água,
- $\mu_W = 1,0 \times 10^{-3}Ns/m^2$ é o valor utilizado para viscosidade da água,
- $\mu_A = 1,8 \times 10^{-5}Ns/m^2$ é o valor utilizado para viscosidade do ar,
- $\rho_W = 995,52kg/m^3$ é o valor utilizado para densidade da água,
- $\rho_A = 1,294kg/m^3$ é o valor utilizado para densidade do ar.

Spedding e Nguyen (1980) realizaram estudos sobre escoamentos bifásicos ar-água, co-corrente em tubo de diâmetro interno $0,0455m$ e propuseram vários mapas. Além da comparação com outros mapas, como o de Baker (1954), os autores

também desenvolveram mapas com tubos inclinados com escoamento ascendente e descendente. Elas propuseram a existência de cerca de doze diferentes padrões de escoamento, sendo que estes foram simplificados em quatro principais categorias [estratificado, bolhas e slug, gotas (“*droplet*”) e misturado (“*mixed*”)]. Sugeriram que as transições dos escoamentos em bolhas e slug para o escoamento estratificado, bem como do escoamento estratificado para o misturado, são notadamente afetados pela inclinação do tubo. Eles observaram que os escoamentos estratificado liso e ondulado não existem no escoamento inclinado ascendente, enquanto que no inclinado descendente os escoamentos em bolhas e slug diminuíram em área. Eles concluíram que um mapa genérico de padrões de escoamento que contivesse as taxas de escoamento das fases e a inclinação do tubo não era exequível. No mapa apresentado, os eixos foram formados pela taxa entre as vazões volumétricas das fases e o número de Froude.

Lin e Hanratty (1987) estudaram o escoamento bifásico ar-água co-corrente em tubos horizontais de diâmetro interno $0,0254m$ e $0,0953m$. Os parâmetros utilizados no mapa foram as velocidades superficiais das fases tendo, portanto a apresentação semelhante ao mapa de Mandhane et al. (1974). Para identificação dos padrões de escoamento foram utilizados sensores de condutância, observação visual e correlação cruzada da pressão. Os limites de transição entre os padrões de escoamento do mapa de Mandhane et al. (1974) e Lin e Hanratty (1987) não apresentaram boa concordância, sugerindo que o mapa dos primeiros autores apresenta uma imprecisão na previsão dos padrões de transição.

Modelos Teóricos para Determinação de Padrões de Escoamento

Taitel e Dukler (1976) desenvolveram um modelo para previsão de transição dos padrões de escoamento através de cinco grupos adimensionais. Segundo os autores o prognóstico da transição entre os limites dos diferentes padrões de escoamento está associado as propriedades dos fluidos, forma geométrica do tubo e ângulo de inclinação do escoamento. O modelo prevê a transição de cinco padrões básicos (estratificado para intermitente, estratificado para anular, intermitente para bolhas dispersas, estratificado liso para estratificado ondulado e intermitente para anular).

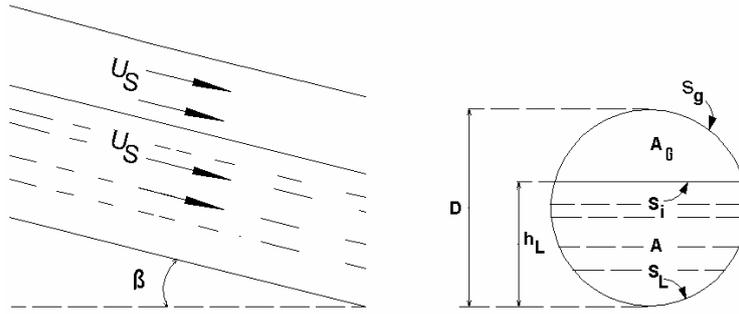


Figura 2.16: Escoamento estratificado em equilíbrio.

A figura 2.16 mostra o escoamento estratificado em equilíbrio.

Segundo Taitel e Dukler (1976), a equação de balanço de momento 2.51 para cada fase é expressa por:

$$-A_L \frac{dP}{dx} - \tau_{WL} S_L + \tau_{Wi} S_i - \rho_L g \sin \beta A_L = 0, \quad (2.88)$$

e

$$-A_G \frac{dP}{dx} - \tau_{WG} S_G - \tau_{Wi} S_i - \rho_G g \sin \beta A_G = 0, \quad (2.89)$$

onde:

- τ_{WL} é a tensão de cisalhamento entre a fase líquido e a parede do tubo,
- τ_{WG} é a tensão de cisalhamento entre a fase gás e a parede do tubo,
- τ_{Wi} é a tensão de cisalhamento na interface gás-líquido.

As tensões de cisalhamento são usualmente representadas na literatura como (Barnea e Taitel, 1993, Chang, 1989, Taitel e Dukler, 1976):

$$\tau_{WL} = \frac{f_L \rho_L U_{LS}^2}{2}, \quad (2.90)$$

$$\tau_{WG} = \frac{f_G \rho_G U_{GS}^2}{2}, \quad (2.91)$$

$$\tau_{Wi} = \frac{f_i \rho_G (U_{GS} - U_{LS})^2}{2}. \quad (2.92)$$

Os fatores de atrito para as fases líquido f_L e gás f_G são expressos por:

$$f_L = C_L \left(\frac{D_L U_{LS}}{\mu_L} \right)^{-n}, \quad (2.93)$$

$$f_G = C_G \left(\frac{D_G U_{GS}}{\mu_G} \right)^{-m}. \quad (2.94)$$

onde:

- D_L é o diâmetro hidráulico da fase líquido,
- D_G é o diâmetro hidráulico da fase gás.

Os diâmetros hidráulicos são obtidos pelas expressões:

$$D_L = \frac{4A_L}{S_L}, \quad (2.95)$$

$$D_G = \frac{4A_G}{S_G + S_i}. \quad (2.96)$$

As constantes C_L , C_G , n e m são apresentadas na tabela 2.6 segundo Taitel e Dukler (1976) e Barnea e Taitel (1993).

Tabela 2.6: Valores das constantes para cálculo dos fatores de atrito.

Constantes	Escoamento Laminar	Escoamento Turbulento
C_L	16	0,046
C_G	16	0,046
n	1,0	0,2
m	1,0	0,2

Para o escoamento estratificado Taitel e Dukler (1976), baseado nos estudos de *Gazley* – 1949, adotou $f_i = f_G$.

Os cinco grupos adimensionais propostos por Taitel e Dukler (1976) para ajudar a prever as transições dos diferentes padrões de escoamento são:

$$X = \sqrt{\frac{\frac{4C_L}{Di} \left(\frac{U_{LS}Di}{\mu_L}\right)^{-n} \frac{\rho_L U_{LS}^2}{2}}{\frac{4C_G}{Di} \left(\frac{U_{GS}Di}{\mu_G}\right)^{-m} \frac{\rho_G U_{GS}^2}{2}}} = \sqrt{\frac{|(dP/dx)_{LS}|}{|(dP/dx)_{GS}|}}, \quad (2.97)$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G) g \sin \beta}{\frac{4C_G}{Di} \left(\frac{U_{GS}Di}{\mu_G}\right)^{-m} \frac{\rho_G U_{GS}^2}{2}} = \frac{(\rho_L - \rho_G) g \sin \beta}{|(dP/dx)_{GS}|}, \quad (2.98)$$

$$Fr_{TD} = U_{GS} \sqrt{\frac{\rho_G}{gDi(\rho_L - \rho_G) \cos \beta}}, \quad (2.99)$$

$$T_{TD} = \sqrt{\frac{\frac{4C_L}{Di} \left(\frac{U_{LS}Di}{\mu_L}\right)^{-n} \frac{\rho_L U_{LS}^2}{2}}{(\rho_L - \rho_G) g \cos \beta}}, \quad (2.100)$$

$$K_{TD} = Fr_{TD} \sqrt{\frac{\rho_L U_{LS} Di}{\mu_L}} = Fr_{TD} \sqrt{Re_L}. \quad (2.101)$$

onde:

- Re_L é o número de Reynolds somente da fase líquida.

Assumindo que na interface do padrão de escoamento estratificado liso a camada de líquido apresenta uma altura constante, que os fatores de atrito da fase gás e líquido são iguais $f_i = f_G$, eles apresentaram as seguintes expressões para prever as mudanças nos padrões de escoamento:

- Para transição do padrão de escoamento estratificado para o intermitente ou anular:

$$Fr_{TD}^2 \left(\frac{1}{(1 - \tilde{h}_L)^2} \frac{\tilde{U}_G^2 d\tilde{A}_L/d\tilde{h}_L}{\tilde{A}_G} \right) \geq 1, \quad (2.102)$$

- Para transição do padrão de escoamento estratificado liso para o estratificado ondulado:

$$K_{TD} \geq \left(\frac{2}{\tilde{U}_L \sqrt{\tilde{U}_G} \sqrt{S_{TD}}} \right), \quad (2.103)$$

S_{TD} é o coeficiente de drenagem (**sheltering**). Taitel e Dukler (1976) adotaram o valor igual a 0,01 baseado no trabalho de Benjamin (1968) o qual sugeriu valores entre 0,01 a 0,03.

- Para transição do padrão de escoamento intermitente para o de bolhas dispersas:

$$T_{TD}^2 \geq \left(\frac{8\tilde{A}_G}{\tilde{S}_i \tilde{U}_L^2 (\tilde{U}_L \tilde{D}_L)^{-n}} \right), \quad (2.104)$$

- Para transição do padrão de escoamento intermitente para o anular:

$$\tilde{h}_L < 0,5. \quad (2.105)$$

Os símbolos com til representam números adimensionais e foram obtidos através das expressões:

$$\tilde{A}_L = \frac{A_L}{Di^2} = 0,25 \left[\pi - \cos^{-1} (2\tilde{h}_L - 1) + (2\tilde{h}_L - 1) \sqrt{1 - (2\tilde{h}_L - 1)^2} \right] \quad (2.106)$$

$$\tilde{A}_G = \frac{A_G}{Di^2} = 0,25 \left[\cos^{-1} (2\tilde{h}_L - 1) - (2\tilde{h}_L - 1) \sqrt{1 - (2\tilde{h}_L - 1)^2} \right], \quad (2.107)$$

$$\tilde{S}_i = S_i/Di = d\tilde{A}_L/d\tilde{h}_L = \sqrt{1 - (2\tilde{h}_L - 1)^2}, \quad (2.108)$$

$$\tilde{U}_L = \tilde{A}/\tilde{A}_L = \pi / (4\tilde{A}_L), \quad (2.109)$$

$$\tilde{U}_G = \tilde{A}/\tilde{A}_G = \pi / (4\tilde{A}_G), \quad (2.110)$$

$$\tilde{h}_L = h_L/Di, \quad (2.111)$$

$$\tilde{D}_L = 4\tilde{A}_L/\tilde{S}_L. \quad (2.112)$$

Observa-se que todos os valores adimensionais com o símbolo til são dependentes somente de $\tilde{h}_L = h_L/Di$ e, que portanto, obtendo-se o valor da altura de líquido h_L é possível prever as transições entre os padrões de escoamento.

Barnea et al. (1980) concluíram que existia boa concordância entre a teoria e os resultados experimentais apresentados por Taitel e Dukler (1976) para tubos com inclinação até $\pm 10^\circ$.

Weisman et al. (1979) propuseram correlações para previsão de transição entre quatro padrões de transição, cobrindo uma larga faixa de propriedades de fluidos e tubos de diâmetros $0,012m$; $0,025m$ e $0,051m$. Entretanto, segundo Spedding e Spence (1993) a correlação proposta por Weisman et al. (1979) não apresentou boa concordância com os dados experimentais disponíveis.

Oliemans e Pots (2006) apresentaram um mapa de padrões de escoamento óleo-gás em grandes diâmetros de acordo com o modelo unidimensional baseando-se no pensamento da escola de Dukler (Universidade de Houston) e Taitel (Universidade de Tel Aviv). Construíram o mapa relacionando nos eixos os números de Froude densimétrico do gás e do líquido. Para um sistema de propriedades físicas constantes, o mapa é equivalente a construir um mapa de coordenadas $(\rho_G U_{GS})$ versus $(\rho_L U_{LS})$. O modelo prevê a aplicação em todos os ângulos, embora fossem utilizados dados principalmente de escoamentos próximos da horizontal e vertical. A figura 2.17 mostra o mapa do padrão de escoamento bifásico óleo-gás descendente de -5° . Observa-se que, de acordo com o mapa proposto, para uma inclinação negativa de -5° ocorre redução da região do escoamento intermitente e aumento da região do escoamento estratificado. Observa-se também que, mantido constante o número de Froude densimétrico do líquido $(\rho_L U_{LS})$, ocorre transição do escoamento estratificado para um tipo de padrão de escoamento denominado pelos autores de intermitente-anular, que representa a região de transição entre eles.

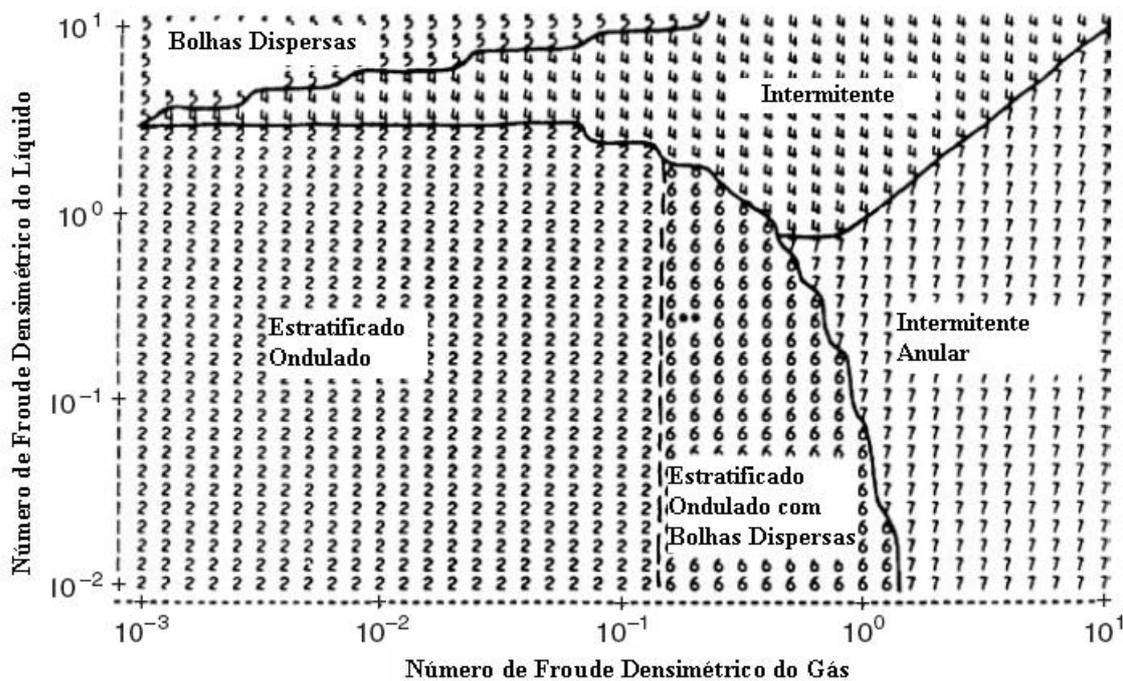


Figura 2.17: Mapa do padrão de escoamento bifásico óleo-gás descendente de -5° segundo Oliemans e Pots (2006).

Com base em 5951 dados experimentais de escoamentos bifásicos com ângulos de inclinação variando de -90° a 90° , Petalas e Aziz (1998) desenvolveram um modelo mecanicista para cálculos de escoamentos multifásicos aplicados a qualquer geometria de tubo e a diferentes propriedades de fluidos. A determinação dos padrões de escoamento foi realizada considerando que existem padrões específicos em cada padrão de escoamento e que estes apresentam critérios de estabilidade. A figura 2.18 apresenta o mapa do padrão de escoamento bifásico ar-água ascendente de 10° obtido pelo modelo desenvolvido pelos autores. Os eixos do mapa são expressos em termos de velocidades superficiais do gás e do líquido, para essa inclinação não se observa o escoamento estratificado e ocorre aumento da região do escoamento intermitente (slug + bolhas alongadas).

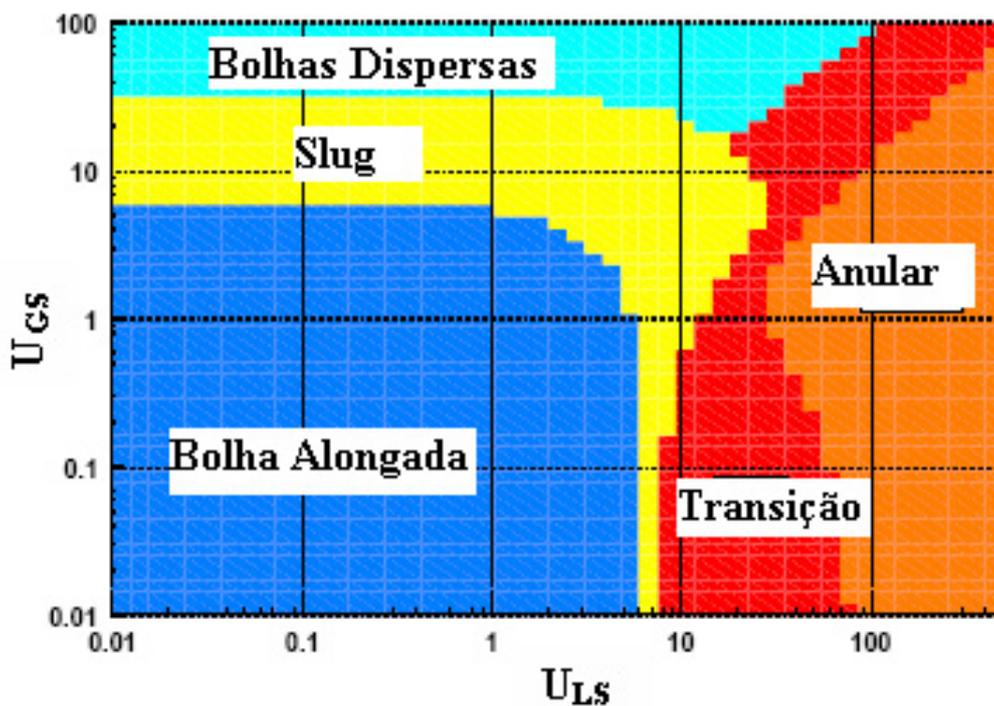


Figura 2.18: Mapa do padrão de escoamento bifásico ar-água ascendente de 10° segundo Petalas e Aziz (1998).

Em relação aos mapas de escoamento, observa-se que a maioria dos mapas desenvolvidos com sucesso cobre faixas limitadas das propriedades dos fluidos e das dimensões do tubo.

2.3 Estudos Sobre o Padrão de escoamento Intermitente

O padrão de escoamento intermitente ocorre em uma grande faixa de ângulos de inclinação de tubos e em uma grande faixa de vazões de líquido e gás. É um tipo de padrão de escoamento altamente complexo, sendo inerentemente instável. Mesmo quando a pressão, as vazões mássicas do gás e líquido e a seção transversal do tubo são mantidas constantes, o escoamento intermitente apresenta grandes variações interfaciais ao longo do tempo.

Durante o escoamento estratificado, bifásico, horizontal líquido-gás, no interior de um tubo, mantendo-se a vazão da fase gasosa constante e aumentando gradativamente a vazão da fase líquida, o nível de líquido sobe e, a partir de uma determinada altura de filme de líquido, ocorre a formação de ondas que crescem rapidamente tendendo a bloquear o escoamento de gás, ou seja, as ondas passam a molhar a parte superior do tubo formando pistões de líquido. A obstrução total do escoamento do gás origina o padrão de escoamento intermitente (slug ou plug). Partindo novamente do escoamento estratificado, mantendo-se a vazão de líquido constante e aumentando a vazão de gás, chegando ao valor próximo de 20 m/s, a fase gás empurra o líquido contra a parede do tubo, originando o escoamento anular que é a formação de um fino filme de líquido que escoava sobre a parede do tubo e gás na região central.

Portanto os padrões de escoamento intermitente e anular são formados a partir do padrão estratificado e ocorrem somente quando as condições favorecem o crescimento da amplitude de uma onda finita na interface estratificada. A transição entre esses padrões é descrita em termos da clássica instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Segundo Issa e Kempf (2003) em tubulações horizontais e com pequenas inclinações, o escoamento slug pode ser originado do escoamento estratificado através de dois mecanismos principais: *a*) crescimento natural das instabilidades hidrodinâmicas e *b*) acúmulo de líquido devido à instantâneos desbalanceamentos entre pressão e força gravitacional causadas pelas flutuações no interior do tubo.

No primeiro caso, pequenas perturbações aleatórias de pequenos comprimen-

tos de onda, na superfície do líquido, elevam-se naturalmente, podendo originar ondas que apresentam grande amplitude e comprimento de onda. A descrição do mecanismo do crescimento dessas ondas é baseado na teoria da instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Tais ondas podem crescer continuamente, absorvendo o líquido a frente delas e aumentando a crista da onda até que toque a parte superior do tubo, formando os pistões de líquido, *escoamento intermitente*. Se a frente e a parte posterior do pistão de líquido estiverem a mesma velocidade ocorrerá sua estabilidade, no caso da velocidade da frente do pistão de líquido for menor que a velocidade da parte posterior, ocorrerá o colapso.

O segundo caso de formação de pistões de líquido ocorre quando a inclinação do tubo provoca o retardo do escoamento e a subsequente acumulação de líquido.

Kordyban e Ranov (1970) foram os primeiros a considerar o início da formação do escoamento intermitente baseado no mecanismo da instabilidade de Kelvin-Helmholtz. Através do escoamento bifásico ar-água em um tubo retangular eles mostraram a importância da proximidade da parede superior do tubo em acentuar a formação do pistão de líquido. A figura 2.19 mostra as alturas das linhas neutras do gás \bar{h}_G e do líquido \bar{h}_L em relação a onda no padrão de escoamento estratificado, de acordo com o com a teoria de Kelvin-Helmholtz.

Para escoamentos estratificados de ondas com grande comprimento de onda e desconsiderando a tensão superficial, em razão das fases serem gás e líquido, os

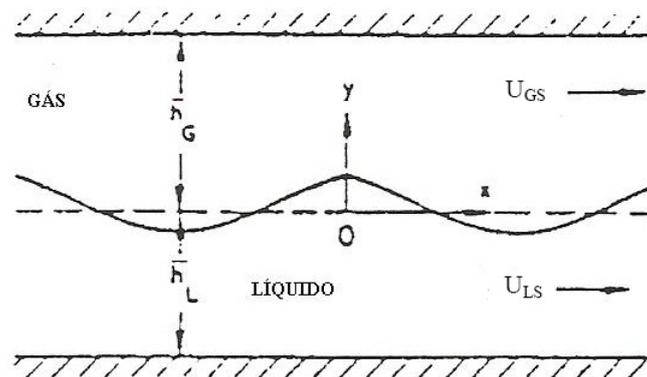


Figura 2.19: Escoamento estratificado - alturas das linhas neutras.

autores propuseram a seguinte correlação para a condição de instabilidade:

$$U_{GS} - U_{LS} > \sqrt{(\rho_L - \rho_G) g \left(\frac{\bar{h}_G}{\rho_G} + \frac{\bar{h}_L}{\rho_L} \right)}, \quad (2.113)$$

Para escoamentos estratificados a baixas pressões, ($\rho_G/\rho_L \ll 1$), e com velocidade superficial do gás bem superior a do líquido, a equação 2.113 passa a ser simplificada para:

$$U_{GS} > \sqrt{(\rho_L - \rho_G) g \left(\frac{\bar{h}_G}{\rho_G} \right)}, \quad (2.114)$$

Taitel e Dukler (1976) desenvolveram um estudo sobre a instabilidade de uma única onda em escoamento estratificado, baseando-se no princípio da instabilidade de Kelvin-Helmholtz e utilizando a equação de Bernoulli. A figura 2.20 mostra uma única onda numa interface horizontal, escoando em um tubo retangular, onde U_{GS} é a velocidade superficial da fase gás sobre a superfície plana do líquido (região de pressão P), U'_{GS} é a velocidade superficial da fase gás sobre a crista da onda (região de pressão P'), h_G é a distância da face plana do líquido até a parte superior do tubo, h'_G é a distância da crista da onda até a parte superior do tubo, h_L é a distância da face plana do líquido até a parte inferior do tubo, h'_L é a distância da crista da onda até a parte inferior do tubo. A redução da seção transversal acima da crista da onda, causa o aumento da velocidade da fase gás, com isso U'_{GS} se torna maior que U_{GS} e, de acordo com a equação de Bernoulli, a relação entre as pressões passa a ser: $P' < P$. Desconsiderando o movimento da onda e sendo o escoamento horizontal, a condição para que a onda cresça é dada por:

$$P - P' > (h_G - h'_G) (\rho_L - \rho_G) g, \quad (2.115)$$

Considerando o equilíbrio entre os pontos P e P' , o efeito de Bernoulli passa a ser expresso por:

$$P - P' = \frac{1}{2} \left(U_{GS}^2 - U'_{GS}{}^2 \right) \rho_G g, \quad (2.116)$$

A instabilidade de Kelvin-Helmholtz ocorre quando diferença de velocidade entre os fluidos ao longo da interface atinge um determinado valor, sendo, portanto, utilizada para prever o início da transição entre os padrões de escoamento estratificado-intermitente que apresentem fluidos de densidades diferentes.

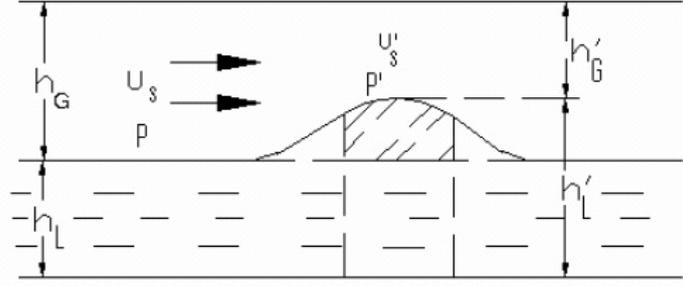


Figura 2.20: Instabilidade de uma onda.

Quando o gás sofre aceleração, ao passar pela abertura acima da onda, provoca a redução da pressão estática de P para P' , e assim, a onda sofre sucção, provocando seu crescimento. Quando a sucção atinge um valor capaz de superar a força da gravidade a onda cresce e inicia-se a transição do padrão de escoamento.

Taitel e Dukler (1976) sugeriram a seguinte correlação para determinação da transição entre o padrão estratificado (liso/ondulatório) para o intermitente (plug/slug):

$$U_{GS} > C_{TD} \sqrt{(\rho_L - \rho_G) g \frac{h_G}{\rho_G}}, \quad (2.117)$$

- C_{TD} está relacionado com o tamanho da onda.

$$C_{TD} = \sqrt{\frac{2}{\frac{h_G}{h'_G} \left(\frac{h_G}{h'_G} + 1 \right)}}, \quad (2.118)$$

Quando o padrão de escoamento estratificado ondulado tende ao estratificado liso, ou seja, h'_g tende a ser igual a h_g , a equação 2.117 retorna a equação da condição de instabilidade de Kelvin-Helmholtz, equação 2.114. Quanto maior a diferença entre h_g e h'_g , menor será o valor de C_{TD} e assim, o valor da velocidade superficial do fase gás, U_{GS} , obtido pela equação 2.117 é menor do que o obtido pela equação 2.114 que, de acordo com a teoria de instabilidade de Kelvin-Helmholtz, a onda não consegue se manter estável.

Para tubos circulares e inclinados Taitel e Dukler (1976) sugeriram a modifi-

cação da equação 2.117 para a seguinte expressão:

$$U_{GS} = \sqrt{\frac{2(\rho_L - \rho_G)g \cos \beta}{\rho_G} \left(\frac{A'_G{}^2}{A_G{}^2 - A'_G{}^2} \right)}, \quad (2.119)$$

No estudo da formação e estabilidade do padrão de escoamento intermitente, um parâmetro bastante estudado é a formação e estabilidade de bolhas alongadas que ocorrem entre pistões de líquido. No escoamento intermitente plenamente desenvolvido ocorre a intermitência entre pistões de líquido e bolhas alongadas. De acordo com a literatura, bolhas alongadas são aquelas cujas dimensões apresentam diâmetros maiores do que 30% ao do diâmetro da tubulação, também são denominadas de bolhas de Taylor.

Nicklin et al. (1962) propuseram uma correlação para prever a velocidade translacional das bolhas alongadas baseados em experimentos realizados no escoamento intermitente vertical, que tem sido aplicada por muitos pesquisadores em escoamentos horizontal e inclinado. Na literatura existem outras denominações para a velocidade translacional da bolha alongada, como velocidade do nariz da bolha ou simplesmente velocidade da bolha. Eles concluíram que a velocidade translacional da bolha alongada é muito próxima da soma da velocidade do líquido na linha de centro à frente do nariz da bolha mais a velocidade de ascensão da bolha no líquido parado. Para uma faixa de número de Reynolds entre 8000 a 50000, os autores propuseram a seguinte correlação:

$$V_{NB} = C_0 V_L + V_0 = C_0 V_L + C_1 \sqrt{gDi}, \quad (2.120)$$

onde:

- V_{NB} é a velocidade translacional de uma única bolha,
- V_L é a velocidade média da fase líquida a frente da bolha,
- C_0 é igual a 1, 2,
- V_0 é a velocidade de deslizamento da bolha alongada no líquido parado (drift velocity),

- C_1 é uma constante devido ao deslizamento das fases, sendo denominada coeficiente de deslizamento. Para as condições experimentais realizadas os autores chegaram ao valor 0,35.

A correlação proposta por Nicklin et al. (1962) são baseadas na velocidade de deslizamento e na constante relacionada ao perfil da velocidade do pistão de líquido C_0 . Quando o número de Reynolds se aproxima de zero, o valor de C_0 se aproxima de 2,0.

Dividindo-se a equação 2.45 por α_G tem-se:

$$\frac{\overline{U_{GS}}}{\alpha_G} = C_0 \overline{U_M} + \langle U_{GU} \rangle, \quad (2.121)$$

Considerando o pistão de líquido não aerado e que a bolha alongada não desprende pequenas bolhas, tem-se que $\alpha_G = \overline{U_{GS}}/\overline{V_{NB}}$, a correlação 2.120 passa a:

$$\overline{V_{NB}} = C_0 \overline{V_L} + \overline{U_{GU}}, \quad (2.122)$$

Comparando a correlação 2.122 com as correlações 2.120 e 2.121 verifica-se que o coeficiente C_0 tem o mesmo significado e que $V_0=U_{GU}$ representa a velocidade de deslizamento da fase gás.

Dukler e Hubbard (1975) generalizaram a correlação proposta por Nicklin et al. (1962), equação 2.120, de uma bolha isolada para uma seqüência de bolhas. Eles propuseram que a velocidade média do nariz da bolha fosse obtida por:

$$V_{NB} = C_D U_M, \quad (2.123)$$

onde:

- V_{NB} é a velocidade média do nariz da bolha,
- C_D é um coeficiente utilizado pelos autores e
- U_M é a velocidade da mistura que representa a velocidade média do líquido dentro do pistão de líquido a frente da bolha.

Segundo Bendiksen e Espedal (1992) no escoamento estratificado ondulado após a onda tocar na parte superior do tubo, o pistão de líquido deve inicialmente

crescer para se estabelecer o padrão intermitente. A condição para o crescimento do pistão de líquido é que a velocidade a sua frente V_{FPL} deve ser maior do que a parte posterior. Também considera-se que a velocidade da parte posterior do pistão de líquido seja igual a velocidade do nariz da bolha, V_{NB} . A figura 2.21 mostra a condição inicial do pistão de líquido após a onda tocar na parte superior do tubo A e o seu crescimento B. Baseado na correlação proposta por Nicklin et al. (1962) e considerando a condição de não deslizamento entre as fases, os autores propuseram a seguinte correlação para representar a velocidade do nariz da bolha, ou de translação.

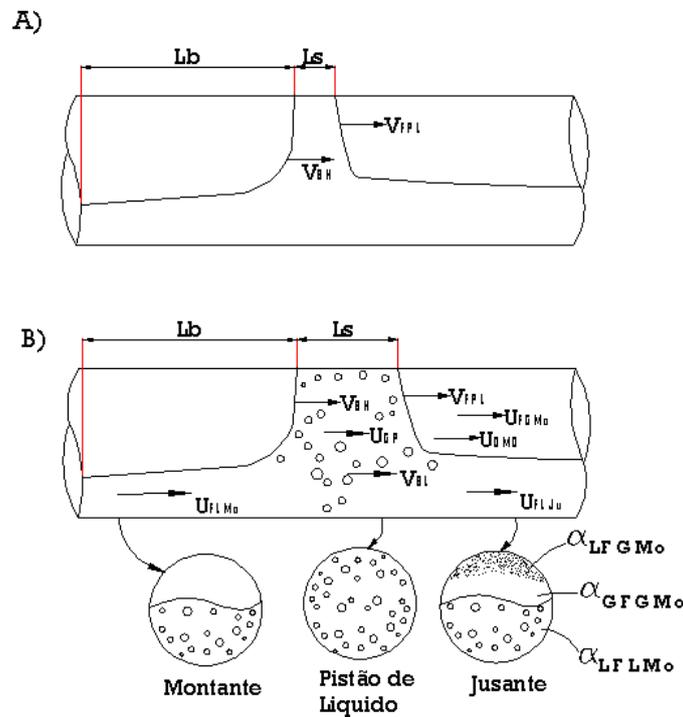


Figura 2.21: Crescimento do pistão de líquido segundo Bendiksen e Espedal (1992).

$$V_{NB} = C_0 U_M + V_0, \quad (2.124)$$

onde:

- U_M é a velocidade superficial total das fases, sendo expressa por:

$$U_M = \alpha_{GP} U_G + \alpha_{LP} U_L, \quad (2.125)$$

- α_{GP} é a fração de vazio no pistão de líquido,

- U_G é a velocidade da fase gás no pistão de líquido,
- α_{LP} é a fração de líquido no pistão de líquido,
- U_L é a velocidade da fase líquida no pistão de líquido.

O critério para sustentabilidade do pistão de líquido é que $V_{NB} < V_{FPL}$. Os autores apresentam duas correlações:

- para a condição de não ocorrência de dispersão de gotas líquidas na fase gás, a velocidade de translação da frente do pistão de líquido é correlacionada por:

$$V_{NB} < V_{FPL} = U_{GfMo} \frac{\alpha_{GfMo} - \alpha_{GP} \left(\frac{U_{GP}}{U_{GfMo}} \right)}{\alpha_{GfMo} - \alpha_{GP}}, \quad (2.126)$$

onde:

- U_{GfMo} é a velocidade média do gás acima do filme líquido e a montante do pistão de líquido (velocidade média da bolha alongada),
 - α_{GfMo} é a fração de vazio acima do filme líquido e a montante do pistão de líquido,
 - U_{GP} é a velocidade média do gás na região do pistão de líquido.
- para a condição de gotas de líquido dispersas na fase gás é correlacionada por:

$$V_B < V_{FPL} = \frac{U_{LP} (1 - \alpha_{GP}) - \alpha_{LJu} \alpha_{LfJu} U_{fLJu} - \alpha_{GfMo} \alpha_{LfGMo} U_{DMo}}{\alpha_{GfMo} - \alpha_{GP}}, \quad (2.127)$$

onde:

- U_{LP} é a velocidade média do líquido na região do pistão de líquido,
- α_{LJu} é a fração de líquido em toda seção transversal do tubo a jusante do pistão de líquido,
- α_{LfJu} é a fração de líquido no filme de líquido e a jusante do pistão de líquido,
- U_{fLJu} é a velocidade média do filme de líquido a jusante do pistão de líquido,

- α_{LfGMo} é a fração de líquido, na forma de gotas, acima do filme de líquido e a montante do pistão de líquido,
- U_{DMo} é a velocidade média das gotas de líquido dispersas no gás acima do filme líquido e a montante do pistão de líquido.

Segundo os autores, a correlação apresentada da equação 2.127 é a condição mais restritiva para crescimento $V_{NB} < V_{FPL}$, colapso $V_{NB} > V_{FPL}$ e estabilidade $V_{NB} = V_{FPL}$ do pistão de líquido em sistemas de média e alta pressão.

Para a condição de não aeração do pistão de líquido, $\alpha_{GP} = 0$, a correlação apresentada da equação 2.126 é simplificada para a condição: $V_{NB} < U_{GfMo}$, tornando a velocidade média da bolha a frente do pistão de líquido a condição prévia para que o pistão de líquido cresça.

Segundo Ruder et al. (1989), definindo a frente do pistão de líquido como um salto hidráulico (hydraulic jump) existe uma velocidade mínima de gás, acima do qual o pistão de líquido em movimento se torna pouco sensível às variações das velocidades das fases gás e líquido. Utilizando o modelo invíscido para a cauda do pistão de líquido, verificaram que a razão entre a altura de líquido na frente do pistão de líquido (espessura de filme de líquido abaixo da bolha alongada) e o diâmetro interno do tubo (D_i) deve apresentar um valor mínimo para estabilidade do padrão intermitente. Com base nos experimentos, os autores sugeriram que a razão h_{LC}/D_i deve apresentar um certo valor para a ocorrência da estabilidade dos pistões de líquido. Para se obter a altura crítica da frente do pistão de líquido, h_{LC} , através de A_{LF} , os autores propuseram a seguinte expressão:

$$(C_F - U_{FS}) A_{LF} \geq Q_{LF}, \quad (2.128)$$

onde:

- C_F é a velocidade da frente do pistão de líquido,
- A_{LF} área ocupada pela fase líquido na frente do pistão de líquido,
- Q_{LF} taxa volumétrica de líquido na frente do pistão de líquido,
- U_{FS} velocidade do filme de líquido no sentido contrário ao do deslocamento da bolha alongada.

Segundo Ruder et al. (1989) o líquido que gera o crescimento da frente do pistão de líquido provém da sua parte posterior durante a propagação. Se a taxa volumétrica da frente do pistão de líquido for maior que a da parte posterior, $Q_{LF} > Q_{LP}$, ocorrerá o desenvolvimento do pistão de líquido, em caso contrário, $Q_{LP} > Q_{LF}$, o pistão de líquido não se estabilizará. Para a existência do pistão de líquido não aerado em um tubo circular, os autores aprestaram a seguinte expressão:

$$\frac{(C_F - U_{FS})}{\sqrt{gD_i}} \geq T_0, \quad (2.129)$$

onde:

- T_0 é uma constante apresentada na tabela 2.7 para diferentes valores de h_{LC}/D_i .

Tabela 2.7: Condição da existência de um pistão de líquido.

h_{LC}/D_i	T_0
0,1	0,9459
0,2	0,9200
0,3	0,9090
0,4	0,9108
0,5	0,9213
0,563	0,935
0,6	0,9440
0,7	0,9937
0,8	1,0778
0,85	1,1444
0,89	1,2106

Fagundes et al. (1999) realizaram um trabalho teórico e experimental do perfil de bolhas alongadas similar às observadas no escoamento intermitente horizontal. O estudo foi feito com bolhas escoando isoladamente em tubo horizontal de PVC transparente de diâmetro interno 53 mm e comprimento de 90 m. Segundo os autores existem duas categorias de bolha que são função principalmente da velocidade da

mistura a frente da bolha. Em termos de números adimensionais, esta velocidade pode ser expressa pelo número de Froude Fr .

A figura 2.22 mostra o perfil da bolha para:

- (A) $Fr < 1$, escoamento intemite pistonado, a bolha apresenta um nariz curto seguido de uma interface ondulada com comprimento de onda constante e amplitude em decaimento. No final da bolha ocorre uma variação de altura da interface que pode ser visto como um salto hidráulico interligado a cauda que termina com uma variação suave da altura da interface e
- (B) $Fr > 2$, escoamento intemite slug, o nariz da bolha apresenta uma interface mais lisa e o final da bolha apresenta um salto hidráulico.

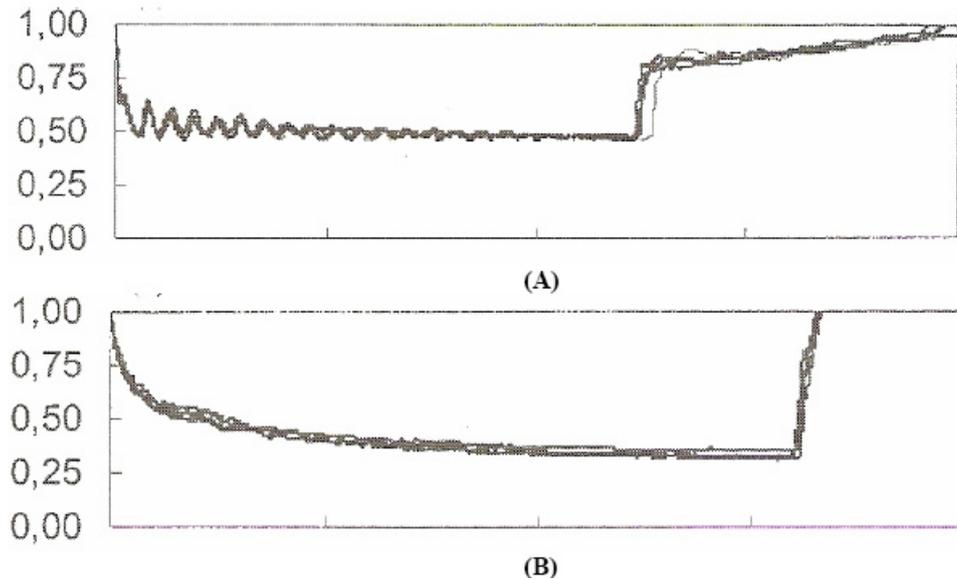


Figura 2.22: Perfil da bolha alongada segundo Fagundes et al. (1999)(A) $Fr < 1$ - Pistonado (B) $Fr > 2$ - Slug.

Fagundes et al. (1999) apresentaram um número de Froude crítico Fr_c que define a transição de um tipo de perfil de bolha para outro, sendo expresso por:

$$Fr_c = \frac{C_d}{0,2}. \quad (2.130)$$

Para determinação do coeficiente de deslizamento C_d , os autores utilizaram a correlação proposta por Weber (1981), na condição de $Fr < 3,5$

$$C_d = 0,542 - \frac{1,76}{B_o^{0,56}}. \quad (2.131)$$

onde B_o é o número de Bond que é função da tensão superficial σ .

$$B_o = \frac{\Delta\rho g D_i^2}{\sigma}. \quad (2.132)$$

Para $Fr \leq 3,5$, adotar $C_d=0$. Os autores apresentaram uma correlação para representar o comprimento da bolha, expresso por:

$$\xi = \frac{V_{NB}t - x}{D_i}. \quad (2.133)$$

onde:

- ξ corresponde a distância relativa entre um ponto qualquer na bolha e o seu nariz, expressa em termos do diâmetro interno do tubo,
- V_{NB} é a velocidade do nariz da bolha, conforme equação 2.120

Distante o suficiente do nariz da bolha $\xi \rightarrow \infty$, o escoamento no filme de líquido é plenamente desenvolvido, assim o perfil da bolha não muda, então:

$$\alpha_L (V_{NB} - U_{fL}) = \varphi, \quad (2.134)$$

$$\alpha_G (V_{NB} - U_{fG}) = 0. \quad (2.135)$$

onde:

- φ é o fluxo líquido abaixo da bolha,
- U_{fL} é a velocidade do filme de líquido abaixo da bolha,
- U_{fG} é a velocidade do gás acima do filme de líquido.

No caso do pistão de líquido não aerado, tem-se:

$$\varphi = V_{NB} - U_M. \quad (2.136)$$

A velocidade do nariz da bolha alongada é calculada pela expressão

$$V_{NB} = C_0 U_M + C_d \sqrt{g D_i}. \quad (2.137)$$

As outras correlações são:

$$Fr_{Rel} = \frac{\varphi}{\sqrt{gDi}}, \quad (2.138)$$

$$U_{fL\infty} = \frac{0,027 + 0,054\varphi/V_{NB}}{1,927 + 0,054\varphi/V_{NB}} V_{NB}, \quad (2.139)$$

$$\alpha_{L\infty} = \frac{\varphi}{V_{NB}} \left[1 + 1,70 \left(\frac{\varphi}{V_{NB}} + 0,5 \right) \left(\frac{\mu_G \rho_G^4}{\mu_L \rho_L^4} \right)^{1/7} \right]. \quad (2.140)$$

onde:

- Fr_{Rel} é o número de Froude baseado na velocidade relativa,
- $U_{fL\infty}$ é a velocidade do filme de líquido distante do nariz da bolha,
- $\alpha_{L\infty}$ é a fração de líquido da bolha alongada distante do nariz da bolha.

Fagundes et al. (1999) apresentaram as seguintes relações para o número de Froude

- $Fr < Fr_c \Rightarrow Fr_{Rel} = C_d,$
- $Fr > Fr_c \Rightarrow Fr_{Rel} = 0,2Fr.$

Relações obtidas:

- $\varphi/V_{NB} = 0,15$ a $0,50,$
- $U_{fL\infty} = 0,034$ a $0,051 V_{NB},$
- $\alpha_{L\infty} = 0,1$ a $0,5.$

Os autores apresentaram as seguintes observações:

- O perfil da bolha é influenciado pelo escoamento do líquido a frente da bolha e se mantém basicamente constante durante seu percurso,
- O perfil da bolha próximo de seu nariz varia com a velocidade do líquido, porém distante dele o perfil é independente das condições do escoamento,
- Bastante distante do nariz da bolha $\xi \rightarrow \infty$ o escoamento no filme líquido é plenamente desenvolvido,

- Bastante distante do nariz da bolha a velocidade do filme líquido $U_{fL\infty}$ é muito menor do que a velocidade do nariz da bolha, conforme equação 2.139,
- Bastante distante do nariz da bolha a velocidade do gás acima do filme de líquido é igual a velocidade de translação da bolha, $U_{fG}=V_B$,
- A altas velocidades da mistura do pistão de líquido U_M o nariz da bolha é direcionado para o centro do tubo,
- Para as bolhas alongadas que apresentam uma cauda bem definida, não se observa entranhamento de pequenas bolhas no pistão de líquido que a sucede e para as bolhas alongadas que terminam em um salto hidráulico, ocorre entranhamento de pequenas bolhas no pistão de líquido.

Rosa (2004) realizou um estudo experimental para medir a velocidade da bolha alongada, a interação entre bolhas alongadas e o mecanismo de entranhamento. Os experimentos foram realizados em um tubo de acrílico horizontal de diâmetro interno 26 mm e comprimento de 23,4 m (comprimento relativo de 900 diâmetros). Dois misturadores foram utilizados na entrada da seção de testes para verificar a influência dos mesmos na formação do escoamento intermitente a como as estruturas do escoamento evoluem ao longo do tubo. Ar e água foram utilizados como fluido de trabalho. Utilizou-se a técnica de condutância onde foram instalados eletrodos resistivos em quatro pontos ao longo do tubo (127Di, 267Di, 494Di e 777Di). Também foi utilizado uma câmera digital de alta velocidade localizada a 494Di. O autor verificou que:

- As fotografias mostraram que o perfil da bolha mudava com o aumento da velocidade,
- Para baixas velocidades a bolha apresenta o nariz e a cauda bem definido,
- A medida que a velocidade aumenta a interface gás-líquido se torna instável, o nariz da bolha aponta para o centro do tubo e a cauda é altamente aerada,
- A velocidade média do nariz da bolha apresenta uma dependência linear com a velocidade da mistura,

- A dependência do número de Froude com o parâmetro de distribuição de fase, C_0 , e a velocidade de deslizamento da bolha, V_0 - *drift velocity*, não foi observada,
- O parâmetro de distribuição de fase C_0 foi 1,12 para os dois tipos de misturadores,
- A velocidade de deslizamento, V_0 , não foi observada na faixa do número de Reynolds $1,3 \times 10^4$ a $6,0 \times 10^4$ e do número de Froude 2,0 a 5,3 estudada,
- A interação entre bolhas feita através de coeficientes de regressão linear não apresentaram valores definidos,
- A diferença nas estruturas do escoamento na entrada da seção, causada pelos dois misturadores, diminui depois de uma distância a jusante do misturador.

2.4 Comprimento da Célula Unitária no Escoamento Intermitente Horizontal

O escoamento intermitente apresenta um comportamento transiente das interfaces gás-líquido e um comportamento estocástico dos comprimentos do pistão de líquido e da bolha alongada. Dukler e Hubbard (1975) e Dukler et al. (1985) estudaram o comprimento do pistão de líquido em tubo horizontal de 38 *mm* e concluíram que o comprimento do pistão de líquido estável aumenta com o número de Reynolds do pistão de líquido e observaram que o comprimento do pistão de líquido estável varia de aproximadamente $12D_i$ a $30D_i$, e são relativamente insensíveis as vazões de gás e líquido. Outros pesquisadores chegaram a conclusões semelhantes e a tabela 2.8 apresenta os comprimentos médios do pistão de líquido para escoamentos horizontais plenamente desenvolvidos.

Wang et al. (2006) realizaram um trabalho para obtenção de comprimentos de pistão líquido por meio experimental e por simulação em um tubo horizontal de 133 *m* de comprimento e diâmetro interno de 50 *mm* utilizando ar misturado com água ou óleo. Verificaram que para velocidades superficiais de gás próximas da

Tabela 2.8: Comprimentos médios dos pistões de líquido em tubos horizontais.

Referência	Di (mm)	Fluidos	Comprimentos médios
Dukler e Hubbard (1975)	38	Ar/Água	12-30Di
Nicholson et al. (1978)	25, 51	Ar/Óleo leve	$\approx 30Di$
Gregory et al. (1978)	25, 51	Ar/Óleo leve	$\approx 30Di$
Barnea e Brauner (1985)	teórico	teóricos	32Di
Andreussi e Bendiksen (1989)	50	Ar/Água	22Di
Nydal et al. (1992)	53	Ar/Água	15-20Di
	90		12-16Di
Manolis (1995)	78	Ar/Água e Ar/Óleo	10-25Di

pressão atmosférica e acima de 6 m/s , o comprimento médio do pistão de líquido é fracamente dependente das velocidades superficiais do líquido e gás. Entretanto para as mesmas condições de pressão e velocidade superficial de gás na faixa de $2,2 \text{ m/s}$ a 6 m/s , o comprimento médio do pistão de líquido cresce com o aumento da velocidade superficial do gás e decresce com a redução da velocidade superficial de líquido. Abaixo da velocidade superficial de gás de $2,2 \text{ m/s}$, o comprimento médio do pistão de líquido cresce com a redução da velocidade superficial do gás e as velocidades de translação das bolhas alongadas correspondentes aos comprimentos médios mínimos do pistão de líquido são $1,9 \text{ m/s}$, $2,6 \text{ m/s}$ e $2,5 \text{ m/s}$ para as velocidades superficiais de líquido de $0,7 \text{ m/s}$, $1,0 \text{ m/s}$ e $1,49 \text{ m/s}$ respectivamente. Apud Grotjahn e Mewes (2001) observaram que a transição do escoamento pistonado para o slug ocorre na velocidade do nariz da bolha alongada igual a $2,2 \text{ m/s}$ e longos pistões de líquido aparecem, indicando uma influência no comportamento das variações dos comprimentos dos pistões de líquido. Há poucas informações na literatura a respeito do comprimento da bolha alongada, normalmente relacionando-a fração de vazio na célula unitária.

2.5 Escoamento Bifásico em Tubulação Inclinada

Uma teoria geral capaz de prever a velocidade de deslizamento e a velocidade de translação da bolha em tubos inclinados não é encontrada na literatura em razão da complexidade em se modelar as mudanças que ocorrem no perfil da bolha variando-se o ângulo de inclinação. As informações obtidas na literatura são predominantemente experimentais. Em relação a velocidade de deslizamento, Zukoski (1966), Bonnecaze et al. (1971) e Bendiksen (1984) observaram que variando o ângulo de inclinação do tubo em relação a horizontal ocorria aumento da velocidade até um determinado ângulo, faixa de 40° a 60°, ocorrendo uma redução da mesma após atingir a máxima velocidade.

Zukoski (1966) investigou o efeito da tensão superficial e da viscosidade do fluido, bem como o efeito da inclinação do tubo na velocidade de bolhas alongadas no líquido estagnado.

Em seu estudo foram utilizados tubos de vidro de diversos diâmetros, 5 mm a 178 mm, com cerca de 1,0 m de comprimento. Também foram utilizados tubos em lucite para verificar a influência do ângulo de contato. De acordo com o autor, a influência do material do tubo só ocorre para diâmetros menores do que 20 mm. O efeito da viscosidade, relacionado através do número de Reynolds, não apresentou influência significativa para número de Reynolds maior do que 20.

$$Re_z = \frac{Di\sqrt{gDi}}{v_L}, \quad (2.141)$$

onde:

- Re_z é o número de Reynolds utilizado por Zukoski (1966)
- v_L é a viscosidade cinemática da fase líquida.

O efeito da tensão superficial foi investigado em termos do parâmetro Σ , expresso pela equação 2.142.

$$\Sigma = \frac{4\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)Di^2} = \frac{4}{Eo}, \quad (2.142)$$

onde:

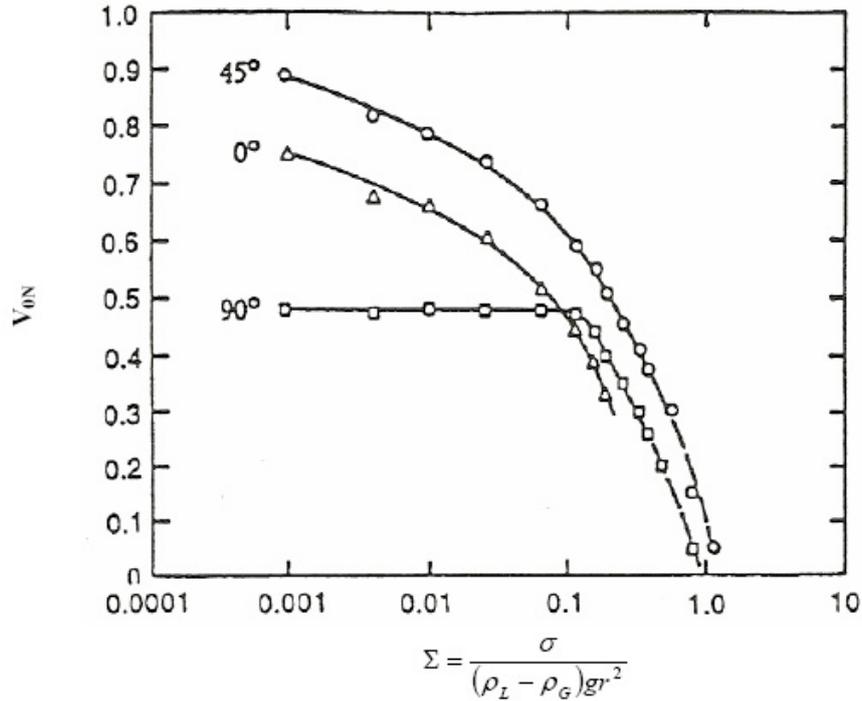


Figura 2.23: Variação da velocidade normalizada versus parâmetro da tensão superficial para 0°, 45° e 90°, segundo Zukoski (1966).

- Eo é o número de Etövs.

A tensão superficial demonstrou apresentar influência para tubos de diâmetro pequeno. Quando o tubo apresenta diâmetro suficientemente pequeno, e assim ocorrendo um aumento da tensão superficial, a velocidade V_0 apresenta decréscimo significativo até se tornar nula. A figura 2.23 mostra a relação entre a variação do parâmetro da tensão superficial Σ e a velocidade normalizada V_{0N} . A velocidade normalizada é expressa por:

$$V_{0N} = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_G)gR}{\rho_L}}}, \quad (2.143)$$

onde:

- R é o raio do tubo.

O número de Froude da bolha, ou da velocidade normalizada, foi definido como:

$$Fr_B = \frac{V_0}{\sqrt{\frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L} g Di}}, \quad (2.144)$$

onde:

- V_0 é a velocidade da bolha no líquido parado (drift velocity).

Da equação 2.144 verifica-se que definidas o diâmetro do tubo e as massas específicas das fases em escoamento o número de Froude da bolha Fr_B é função de V_0 e portanto, apresenta relação com o ângulo de inclinação do tubo.

Bonnecaze et al. (1971) realizaram um estudo experimental da velocidade translacional de bolhas alongadas. Os experimentos foram realizados com ângulo de inclinação em relação a horizontal variando entre -10° a 10° . Os autores, baseado na correlação proposta por Nicklin et al. (1962) para predição da velocidade de translação de bolhas alongadas, propuseram uma nova correlação:

$$V_B = C_0 U_{LS} + \delta_B V_0, \quad (2.145)$$

onde:

- V_{NB} é a velocidade do nariz da bolha,
- C_0 é igual a 1, 2,
- U_{LS} é a velocidade superficial do líquido,
- δ_B é o fator relativo a geometria do tubo,
 - $\delta_B = 1$, escoamento ascendente,
 - $\delta_B = 0$, escoamento horizontal,
 - $\delta_B = -1$, escoamento descendente.
- V_0 é a velocidade de deslizamento da bolha alongada, *drift velocity*, da fase gás relativa a fase líquida, sendo expressa por:

$$V_{0B} = \sqrt{(3,43 \cos \beta + \sin \beta) g Di} \left(0,35 \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L} \right), \quad (2.146)$$

Os autores observaram que à medida que o ângulo de inclinação do tubo aumentava, ocorria inicialmente um aumento gradativo da velocidade da bolha até um

valor máximo, ocorrendo em seguida um decréscimo da mesma. Isto deu uma explicação qualitativa, porém os valores quantitativos da velocidade do nariz da bolha alongada em função do ângulo de inclinação não apresentaram boa concordância com os resultados apresentados na literatura.

Bendiksen (1984) realizou estudo em escoamentos bifásicos em tubos com inclinação variando entre -30° a 90° e com diâmetros internos de 19,2 mm, 24,2 mm e 50,0 mm. A medida das velocidades das bolhas foi realizada através da técnica óptica por luz infravermelho, que tem como princípio físico às propriedades de reflexão da interface ar-água. O autor também utilizou a técnica fotográfica.

Através de uma extensa investigação Bendiksen (1984) verificou que C_0 e V_0 são dependentes dos números de Reynolds Re e Froude Fr , como também, da tensão superficial e ângulo de inclinação do tubo, β . Adotou a correlação proposta por Nicklin et al. (1962), equação 2.120, para a velocidade do nariz da bolha. As seguintes correlações foram propostas:

- para $\beta \geq 0^\circ$ e $Fr_L \geq 3,5$, V_0 é expressa por:

$$V_0 = 0,35 (gDi)^{1/2} \sin \beta, \quad (2.147)$$

- para $\beta > 0^\circ$ e $Fr_L < 3,5$, V_0 é expressa por:

$$V_0 = 0,54 (gDi)^{1/2} \cos \beta + 0,35 (gDi)^{1/2} \sin \beta, \quad (2.148)$$

- para o escoamento do líquido horizontal ou inclinado, $\beta \geq 0^\circ$ e $Fr_L < 3,5$:

$$C_0 = 1,05 + 0,15 (\sin \beta)^2, \quad (2.149)$$

$$C_1 = 0,54 \cos \beta + 0,35 \sin \beta. \quad (2.150)$$

- para o escoamento do líquido horizontal ou inclinado, $\beta \geq 0^\circ$ e $Fr_L \geq 3,5$:

$$C_0 = 1,2, \quad (2.151)$$

$$C_1 = 0,35 \sin \beta. \quad (2.152)$$

onde:

$$Fr_L = U_{LS} / \sqrt{gDi}, \quad (2.153)$$

- U_{LS} é a velocidade superficial do líquido e
- Di o diâmetro interno do tubo.

Segundo o autor, se o filme líquido abaixo da bolha alongada não apresentar escoamento acelerado, existindo assim equilíbrio entre as forças de fricção e gravitacional, sua velocidade média, a jusante do pistão de líquido considerado, pode ser expressa por:

$$U_{FLJu} = \sqrt{\frac{2g\pi\alpha_L Di \sin \beta}{f_L (\pi - \theta)}}, \quad (2.154)$$

onde:

- f_L é o fator de fricção do líquido com a parede do tubo,
- θ , é o ângulo correspondente ao segmento da fase líquida.

Segundo Bendiksen (1984), a equação 2.154 só é aplicada para baixos valores de U_{FLJu} , pois para altas velocidades o efeito da fricção interfacial deve ser considerado. Entretanto, de acordo com os experimentos realizados, o efeito da fricção interfacial somente é expressivo no caso de tubulações de grande diâmetro e ângulos com inclinação menores ou igual a -20° . Esta equação não só apresenta o limite mínimo da velocidade do filme de líquido, mas também uma estimativa razoável para a velocidade crítica. Para o caso da não ocorrência de aceleração, ou desaceleração, no escoamento do filme líquido, mantendo-se então constante a sua altura, ($dh_L/dx = 0$), a equação 2.154 pode ser escrita na forma adimensional a seguir:

$$Fr_B = \frac{U_{FLJu}}{\sqrt{gDi \sin \beta \sqrt{\alpha_L}}} \sqrt{\frac{f_L (\pi - \theta)}{2\sqrt{\alpha_L}}} \geq 1, \quad (2.155)$$

$$Fr_B = Fr_f \sqrt{\frac{f_L (\pi - \theta)}{2\sqrt{\alpha_L}}} \geq 1. \quad (2.156)$$

onde:

- Fr_f é interpretado como o número de Froude do filme líquido.

Segundo Bendiksen e Espedal (1992) os valores de C_0 e V_0 propostos por Bendiksen (1984) podem ser aplicados para pistões de líquido de comprimento maior ou igual a dez vezes o diâmetro, $L_{PL} \geq 10Di$.

Weber et al. (1986) estudaram a velocidade de bolhas alongadas escoando através de líquidos estacionários em tubos de vidro com comprimento de 1,2 m e diâmetros variando entre 6,0 mm até 37,3 mm. Os tubos apresentaram inclinação de 0° até 90° . A técnica utilizada para medição das velocidades das bolhas não foi detalhada. Com base na equação proposta por Bendiksen (1984):

$$Fr = Fr_H \cos \beta + Fr_V \sin \beta, \quad (2.157)$$

Os autores adicionaram um termo de correção para uma melhor representação dos dados experimentais obtidos, modificando a equação para:

$$Fr_L = Fr_{LH} \cos \beta + Fr_{LV} \sin \beta + Q_w, \quad (2.158)$$

onde os subscritos H e V se referem ao número de Froude relativo a velocidade superficial do líquido Fr_L para as posições, respectivamente, horizontal e vertical.

Q_w é um termo de correção dependente da diferença entre os números de Froude ΔFr na vertical e horizontal, conforme equações abaixo:

$$\Delta Fr_L = Fr_{LV} - Fr_{LH}, \quad (2.159)$$

- para $\Delta Fr_L \leq 0$

$$Q_w = 0;$$

- para $\Delta Fr_L > 0$

$$Q_w = 1,37 (\Delta Fr_L)^{2/3} \sin \beta (1 - \sin \beta). \quad (2.160)$$

A equação 2.158 pode ser colocada em função da velocidade da bolha V_0 :

$$\frac{U_{LS}}{\sqrt{gDi}} = \frac{U_{LSH}}{\sqrt{gDi}} \cos \beta + \frac{U_{LSV}}{\sqrt{gDi}} \sin \beta + Q_w, \quad (2.161)$$

Andreussi e Bendiksen (1989) realizaram o estudo da fração de vazio do pistão de líquido no escoamento bifásico horizontal e inclinado com variação de -3° a

0,5°. Nos experimentos foram utilizados dois tubos de acrílico de comprimento 17 m e diâmetros internos 50 mm e 90 mm. Para medição da fração de vazio foram utilizados transdutores de condutância em forma anelar, fabricados em aço inoxidável, e montados no interior das tubulações, de maneira a ocorrer o faceamento entre o diâmetro interno do tubo e os diâmetros internos dos transdutores. Os autores observaram que:

- Há uma influência apreciável do diâmetro da tubulação na fração de vazio do pistão de líquido,
- Pequenas variações na inclinação da tubulação resultam em efeitos apreciáveis na fração de vazio a baixas e moderadas velocidades da mistura,
- A fração de vazio do pistão de líquido somente é diferente de zero quando acima de um valor mínimo da velocidade da mistura,
- Os efeitos da tensão superficial e densidade de gás afetam fortemente a fração de vazio.

Felizola e Shoham (1995) realizaram estudo teórico e experimental no padrão de escoamento bifásico ascendente intermitente. A mistura bifásica em estudo foi ar-querosene, utilizando um tubo de PVC transparente de diâmetro 51 mm e comprimento de 15 m. O tubo apresentou inclinação variando entre 0° a 90° com incrementos de 10°. Três sensores capacitivos foram utilizados para medir a fração de líquido, velocidade e distribuição de comprimentos.

Para medir a fração de líquido na seção transversal da bolha alongada em função da altura de líquido h_L e do diâmetro interno D_i , os autores sugeriram a expressão:

$$\alpha_{LB} = \frac{1}{\pi} \left[\pi - \arccos \left(2 \frac{h_L}{D_i} - 1 \right) + \left(2 \frac{h_L}{D_i} - 1 \right) \sqrt{1 - \left(2 \frac{h_L}{D_i} - 1 \right)^2} \right]. \quad (2.162)$$

Os autores apresentaram a tabela 2.9 que relaciona o ângulo de inclinação do tubo com a razão entre o comprimento do pistão de líquido e o diâmetro da tubulação.

Cook e Behnia (2000) realizaram um estudo experimental e numérico para medir a taxa de colapso de pequenos pistões de líquido em função de seu comprimento.

Tabela 2.9: Comprimento do pistão de líquido versus ângulo de inclinação.

Ângulo de inclinação (β)	Relação comprimento médio e diâmetro (L_{PL}/Di)	Desvio padrão
0°	27,3	3,2
10°	20,2	4,8

Os experimentos foram realizados em um tubo de acrílico de diâmetro interno 50 mm, com escoamento ascendente segundo ângulo de 5°. Ar e água foram utilizados como fluidos de trabalho. As velocidades das bolhas foram medidas utilizando a técnica de condutância onde através do contato entre os eletrodos e as interfaces foram identificadas a frente e a cauda da bolha.

O estudo foi realizado para o líquido parado e em turbulência. Os autores observaram que os resultados para o líquido em turbulência podem ser correlacionados pela mesma expressão independente do valor do número de Reynolds. No caso do líquido parado foi proposta a correlação:

$$\frac{V_{NB}}{V_{NB+1}} = 1,0 + 1,14 \exp\left(-0,48 \frac{L_{PL}}{Di}\right). \quad (2.163)$$

onde:

- V_{NB} é a velocidade do nariz da bolha alongada a frente do pistão de líquido,
- V_{NB+1} é a velocidade do nariz da bolha alongada atrás do pistão de líquido desenvolvido,
- L_{PL} , é o comprimento do pistão de líquido,
- Di é o diâmetro interno do tubo.

No caso do líquido em turbulência foi proposta a correlação:

$$\frac{V_{NB}}{V_{NB+1}} = 1,0 + 0,56 \exp\left(-0,46 \frac{L_{PL}}{Di}\right). \quad (2.164)$$

Apesar da diferença entre as equações 2.163 e 2.164, verifica-se que aumentando-se o valor da relação L_{PL}/Di chega-se ao comprimento mínimo estável do pistão de líquido próximo de 10 vezes o diâmetro interno do tubo, tanto para o líquido parado quanto em turbulência.

A relação V_{NB}/V_{NB+1} , para o líquido em turbulência, permaneceu constante em todas as velocidades da mistura U_M estudada, equação 2.164. Isto apresenta uma concordância qualitativa com os resultados apresentados por Pinto et al. (1998) no estudo realizado em escoamento vertical.

Os autores também desenvolveram um modelo para previsão do comprimento do filme de líquido em escoamento inclinado. Através do balanço de massa da fase líquida abaixo da bolha alongada, foi proposta a seguinte expressão para o comprimento do filme de líquido:

$$L_f = \frac{U_{GS}L_{PL}}{(1 - H_{Lf})V_{NB} - U_{GS}}. \quad (2.165)$$

Os autores estimaram um valor médio da fração de líquido, *holdup*, no final do filme líquido, considerando que, em uma bolha alongada no escoamento horizontal a velocidade do filme de líquido é próxima de zero. Através do balanço de massa foi proposta a correlação:

$$H_{Lfe} \approx \frac{V_{NB} - U_M}{V_{NB}}. \quad (2.166)$$

Cook e Behnia (2001) realizaram um estudo experimental e numérico da velocidade do nariz da bolha no escoamento intermitente inclinado. Os experimentos foram realizados em tubos de acrílico de diâmetro interno 32 mm e 50 mm e com escoamentos ascendentes segundo os ângulos de 5° e 10°. A técnica empregada foi a mesma conforme descrito em Cook e Behnia (2000).

Não verificaram diferenças significativas nas velocidades das bolhas escoando individualmente e em intermitência nos tubos.

De acordo com a equação 2.124, a velocidade de translação da bolha é função da velocidade da mistura U_M e da velocidade da bolha no líquido parado V_0 . Os autores observaram que em cada ângulo de inclinação existem duas regiões distintas; para baixas vazões a velocidade de translação da bolha aumenta de forma relativamente lenta em relação a velocidade da mistura, até que ocorra uma transição onde a velocidade da bolha passa a aumentar de maneira mais rápida. Em ambas regiões existe uma relação linear entre a velocidade de translação da bolha e a velocidade da mistura. Foram propostas as seguintes correlações:

- para baixas vazões

$$V_{NB} = 1,0U_M + V_0. \quad (2.167)$$

- para moderadas e altas vazões

$$V_{NB} = 1,2U_M. \quad (2.168)$$

As correlações acima apresentam como limite de transição a expressão:

$$U_M = 5,0V_0. \quad (2.169)$$

Com as velocidades da mistura acima do valor da velocidade de transição, não se verifica nenhum efeito da velocidade da bolha no líquido parado, *drift velocity*. Segundo os autores, isto é consistente com as observações de Bendiksen (1984) que para o número crítico de Froude ($Fr_L = 3,5$), a posição radial do nariz da bolha se move do topo para o eixo longitudinal do tubo e a taxa de propagação da bolha é controlada pela velocidade local do líquido na sua extremidade. Assumindo um perfil de velocidade do líquido a frente da bolha, então esta velocidade estará próxima de 1,2 vezes a velocidade de escoamento da mistura para escoamentos turbulentos.

Para escoamentos com valor da velocidade da mistura abaixo da velocidade crítica, a velocidade do nariz da bolha é dependente do diâmetro do tubo e do ângulo de inclinação. Segundo Bendiksen (1984) a transição ocorre em estágios, porém Cook e Behnia (2001) não encontraram evidências em seu trabalho. Os autores também verificaram que o número de Froude, relativo à transição, não é um valor constante, como sugerido por Bendiksen (1984) e Ferré (1979), mas aumenta com a inclinação do ângulo.

Mukherjee e Brill (1983) realizaram estudo da fração de líquido em misturas bifásicas ar-querosene e ar-óleo (lube oil), nos escoamentos horizontal e inclinado utilizando a técnica por eletrodos capacitivos em uma tubulação de diâmetro interno 38,1 mm. Os autores apresentaram a seguinte correlação para a fração de vazio:

$$\alpha_G = 1 - \exp^{K_{MB}}, \quad (2.170)$$

$$K_{MB} = A_1 + A_2 \sin \beta + A_3 \sin^2 \beta + A_4 \frac{\mu_L}{(\rho_L \sigma^3)^{0,25}} \left[U_{SG} \left(\frac{\rho_L}{g\sigma} \right)^{0,25} \right]^{A_5} \left[U_{SL} \left(\frac{\rho_L}{g\sigma} \right)^{0,25} \right]^{-A_6} \quad (2.171)$$

Tabela 2.10: Valores das constantes da correlação de Mukherjee e Brill (1983).

Direção	Padrão	A_1	A_2	A_3
<i>Ascendente</i>	<i>Todos</i>	-0,300113	0,129875	-0,119788
<i>Descendente</i>	<i>Estratificado</i>	-1,330282	4,808139	4,171584
<i>Descendente</i>	<i>Outros</i>	-0,516644	0,789805	0,551627
Direção	Padrão	A_4	A_5	A_6
<i>Ascendente</i>	<i>Todos</i>	2,343227	0,4756865	0,288657
<i>Descendente</i>	<i>Estratificado</i>	56,262268	0,079951	0,504887
<i>Descendente</i>	<i>Outros</i>	15,519214	0,371771	0,393952

A tabela 2.10 apresenta os valores das constantes da correlação acima.

Abdul-Majeed (2000) apresentaram uma correlação empírica para estimar a fração de líquido do pistão líquido α_{LP} , (*slug liquid holdup*), no escoamento horizontal e inclinado com variação de -10° a 9° . Utilizando um banco de dados de fluidos bifásicos obtidos na literatura, (“*ar-querosene, ar-óleo leve, freon-água, ar-água e nitrogênio-diesel*”), com diâmetros variando de 25,8mm a 203,2mm, a fração de líquido do pistão líquido variando entre 0,26 a 1,0 e ângulo de inclinação variando entre -10° a 10° , a correlação proposta é expressa por:

$$\alpha_{LP} = (1,009 - R_v U_{MPL}) R_i, \quad (2.172)$$

onde:

- U_{MPL} é a velocidade da mistura do pistão de líquido,
- R_v

$$R_v = 0,006 + 1,3377 \frac{\mu_G}{\mu_L}, \quad (2.173)$$

μ_G é a viscosidade do gás, μ_L é a viscosidade do líquido, ambos em *Pa.s*.

- $R_i = 1,0$ para escoamento horizontal e inclinado descendente $\beta \leq 0$
 $R_i = 1,0 - \sin \beta$ para escoamento ascendente $\beta > 0$

Segundo o autor:

- O diâmetro do tubo e a tensão superficial têm pouco efeito sobre a fração de líquido no pistão de líquido,
- Não existem modelos capazes de prever a fração de líquido no pistão de líquido ao mesmo tempo para os escoamentos horizontal e inclinado.

Coddington e Macian (2002) apresentaram um estudo avaliando a precisão de 13 correlações da fração de vazio baseado no modelo de deslizamento, *drift – flux model*, de Findlay-Zuber. Com base nos estudos os autores propuseram uma nova correlação:

$$\alpha_G = \frac{U_{GS}}{U_{GS} \left(1 + \left(\frac{U_{LS}}{U_{GS}} \right)^{10} \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \right) + 2,9 \left(\frac{g\sigma[\rho_L - \rho_G]}{\rho_L} \right)^{0,25}} . \quad (2.174)$$

Lioumbas et al. (2005) realizaram um trabalho experimental com foco no estudo da estrutura abaixo da interface ar-água durante a transição do escoamento estratificado liso para o estratificado ondulado, isto é, o estudo da transição dentro da fina camada líquida. Utilizaram uma tubulação de acrílico de diâmetro interno 24 mm e comprimento de 7,0 m. Os experimentos foram realizados no escoamento inclinado descendente sem vazão de gás e com vazão de gás concorrente com ângulo de inclinação variando de -1° a -8° . Nos experimentos os autores utilizaram a técnica de condutância através de dois arames paralelos ao longo do eixo da tubulação para medir a espessura da camada limite e a técnica óptica laser-Doppler *LDA* para investigar a estrutura do escoamento da fina camada de líquido e a técnica de visualização utilizando uma câmera de vídeo de alta velocidade, 250 quadros por segundo, para registro e análise de detalhes do escoamento. Os autores observaram que o início das ondas interfaciais é fortemente afetado pela estrutura do escoamento da camada líquida durante uma curta faixa do número de Reynolds.

Woldesemayat e Ghajar (2007) realizaram um estudo da fração de vazio em diferentes padrões de escoamento nos escoamento horizontal e inclinado ascendente, realizando a comparação entre 68 correlações encontradas na literatura para obter a mais precisa. Depois de sistematicamente refinarem as correlações, chegaram a conclusão que a correlação proposta por Coddington e Macian (2002), equação 2.174,

apresentou a melhor capacidade de prever as frações de vazão nos escoamentos vertical e inclinado, bem como uma muito boa concordância para o escoamento horizontal. Foi a única correlação capaz de prever razoavelmente o conjunto de dados para os diversos ângulos de inclinação, apresentando índices de erro de 10% a 15%. Com base nesta correlação os autores propuseram ajustes, inserindo dois fatores: um relacionado a influência do ângulo de inclinação $(1 + \cos \beta)^{0,25}$ e o outro a pressão de operação $(1 + \sin \beta)^{\frac{P_{ATM}}{P_{SIST}}}$. A correlação com os novos ajustes passou a ser expressa por:

$$\alpha_G = \frac{U_{GS}}{U_{GS} \left(1 + \left(\frac{U_{LS}}{U_{GS}} \right)^{10 \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}}} \right) + 2,9 \left(\frac{g \sigma (1 + \cos \beta) [\rho_L - \rho_G]}{\rho_L^2} \right)^{0,25} (1,22 + 1,22 \sin \beta)^{\frac{P_{ATM}}{P_{SIST}}}}. \quad (2.175)$$

2.6 Velocidade Translacional de Bolhas Alongadas

Na literatura são encontradas diversas correlações para calcular a velocidade translacional da bolha alongada ou velocidade do nariz da bolha. Observa-se que todas são baseadas na relação proposta por Nicklin et al. (1962), equação 2.120, porém com valores diferentes para os parâmetros C_0 e C_1 e adotando a velocidade da mistura, U_M no lugar da velocidade média do líquido, sendo expressa como:

$$V_{NB} = C_0 U_M + V_0 = C_0 U_M + C_1 \sqrt{g D_i}, \quad (2.176)$$

Na tabela 2.11 são apresentadas as principais correlações encontradas na literatura.

Com as seguintes simbologias:

- H , In e V representam respectivamente as direções para os escoamentos Horizontal, Inclinado e Vertical,
- Fr_L é o número de Froude relativo a velocidade superficial do líquido, conforme equação 2.153,
- Fr é o número de Froude relativo a velocidade da mistura no pistão de líquido, conforme equação 2.53,

Tabela 2.11: Correlações para cálculo da velocidade de translação da bolha alongada.

Autor - Direção	C_0	C_1
<i>Nicklin et al</i> (1962) - V	1,2	0,351
<i>Dukler e Hubbard</i> (1975) - H	$1,022 + 0,021 \ln(Re)$	-
<i>Ferre</i> (1979) - H	1,10	0,44
	para $Fr \leq 2,26$	para $Fr \leq 2,26$
	1,30	0
	para $2,26 < Fr < 8,28$	para $2,26 < Fr < 8,28$
	1,02	3
	para $Fr \geq 8,28$	para $Fr \geq 8,28$
<i>Bendiksen</i> (1984) - H/In/V	$1,05 + 0,15 (\sin \beta)^2$	$0,54 \cos \beta + 0,35 \sin \beta$
	para $Fr_L < 3,5$	para $Fr_L < 3,5$
	1,2	$0,35 \sin \beta$
	para $Fr_L \geq 3,5$	para $Fr_L \geq 3,5$
<i>Theron</i> (1989) - H/In/V	$1,3 - \frac{0,23}{Fr} + 0,13 (\sin \beta)^2$	$(-0,5 + \frac{0,8}{Fr}) \cos \beta + 0,35 \sin \beta$
<i>Woods e Hanratty</i> (1996) - H	1,1	0,52
	para $Fr < 3,1$	para $Fr < 3,1$
	1,2	0
	para $Fr \geq 3,1$	para $Fr \geq 3,1$
<i>Petalas e Aziz</i> (1998) - H/In/V	$\frac{1,64+0,12 \sin \beta}{(Re)^{0,031}}$	-
<i>Rodrigues et al</i> (2008) - H	1,66	0,54
	$Re < 1000$	$Re < 1000$
	0,97	0,54
	$Re > 1000$ e $Fr_L < 3,3$	$Re > 1000$ e $Fr_L < 3,3$
	1,19	0,00
	$Re > 1000$ e $Fr_L \geq 3,3$	$Re > 1000$ e $Fr_L \geq 3,3$

- Re , é o número de Reynolds da mistura,
- $Re = \frac{\rho_L U_M D_i}{\mu_L}$,
- $\Gamma = 1 + \frac{Fr \cos \beta}{Fr_c}$ e
- $Fr_c = 3, 5$.

2.7 Técnicas de Medição em Escoamentos Bifásicos

As técnicas utilizadas na medição de parâmetros de escoamentos bifásicos podem inicialmente ser divididas em técnicas invasivas, invasivas indiretas e não invasivas.

2.7.1 TÉCNICAS INVASIVAS

Para as técnicas invasivas aplicadas em escoamento bifásico utiliza-se normalmente a medição da impedância elétrica do meio bifásico por meio de eletrodos, assim procura-se relacionar a impedância elétrica do meio com parâmetros bifásicos.

Este método baseia-se no fato de que as fases líquido e gás apresentam diferentes condutividades elétricas e permissividades relativas (constante dielétrica), podendo ser dividido em duas categorias: método capacitivo e resistivo. O produto entre a resistência R e a capacitância C_{el} elétrica está relacionado com a constante dielétrica ϵ_{el} e a condutividade elétrica K_{el} do meio bifásico.

$$RC_{el} = \frac{\epsilon_{el}}{K_{el}}, \quad (2.177)$$

O produto RC_{el} relaciona as grandezas elétricas do equipamento com as características elétricas do meio bifásico. Em escoamentos bifásicos os métodos resistivos são utilizados com frequências abaixo de 100 KHz e os métodos capacitivos com frequências bem superiores.

a) Método Resistivo

Os sensores resistivos funcionam de acordo com diferença de condutividade entre as fases, sendo os anemômetros de filme-quente AFQ muito utilizados em

escoamentos bifásicos (Fossa et al., 2003, Serizawa et al., 1975). Seu funcionamento baseia-se na transferência de calor de um pequeno sensor aquecido eletricamente e exposto ao escoamento, estabelecendo uma relação de pertinência entre a velocidade do escoamento e a resistência observada no filamento aquecido. A Lei de King (1914) é uma das mais conhecidas e utilizadas em anemometria a fio-quente. A forma geral proposta por King pode ser expressa como:

$$Nu = D_1 + D_2 Re^{-0,5}, \quad (2.178)$$

Para aplicações práticas a Lei de King pode ser escrita como:

$$E_{el} = D_1 + D_2 Re^p, \quad (2.179)$$

onde:

- Nu é o número de Nusselt,
- Re é o número de Reynolds,
- E_{el} , é a tensão elétrica na saída no anemômetro,
- D_1 , D_2 e p são constantes empíricas a serem determinadas mediante a calibração do sensor.

A velocidade local instantânea do escoamento pode ser determinada, medindo a diferença de tensão na saída do circuito que alimenta o sensor e realizando-se, em seguida, a conversão deste sinal elétrico em velocidade.

Segundo Freire et al. (2006) a anemometria de filme-quente *AFQ* constitui-se um método de investigação pouco intrusivo devido às pequenas dimensões do elemento sensível.

Segundo Boyer et al. (2002) a calibração do sensor, isto é, a determinação dos parâmetros de King, é realizada através de uma técnica de medição por referência, sendo necessário, por exemplo, um ajuste para cada tipo de padrão de escoamento. Também, é necessária a verificação diária da curva de calibração, pois as características do sensor podem variar rapidamente.

b) Método Capacitivo

O método capacitivo é encontrado na literatura para caracterização de escoamentos bifásicos (Cho et al., 2005, Divora et al., 1980, Hogset e Ishii, 1997), sendo seu funcionamento baseado na diferença entre as constantes dielétricas das fases. Deve-se observar que os transdutores de capacitância ao entrarem em contato elétrico com o fluido, necessitam operar em alta frequência (20-30 MHz) para determinação da permissividade elétrica. O uso de fontes de alta frequência introduz instabilidades elétricas que tornam o instrumento muito suscetível às variações de capacitância e aos efeitos de proximidade.

Os métodos resistivo e capacitivo, em razão de serem intrusivos, são suscetíveis a vazamentos e o fato de os transdutores ficarem fixos no local de medição, torna, muitas vezes, difícil a calibração e impossível a troca do ponto de medição.

2.7.2 Técnicas Invasivas Indiretas

Como técnicas invasivas indiretas existem os métodos de medição por diferença de pressão que são utilizados para distinguir padrões de escoamento. Weisman et al. (1979) concluíram que a flutuação das diferenças de pressão possibilitava a determinação dos padrões de escoamento e desenvolveram um conjunto de critérios relativamente simples que foram aplicados para criação de um oscilógrafo de traços de pressão diferencial. Os padrões de escoamento eram simplesmente distinguidos pela comparação da amplitude e frequência da variação de pressão em relação ao tempo. Matsui (1984) realizou a identificação de padrões de escoamento bifásico vertical relacionando propriedades estatísticas com a variação da pressão diferencial. Tutu (1982) também realizou a identificação de padrões de escoamento relacionando a raiz quadrada média da flutuação de pressão (RMS) com a técnica estatística função densidade de probabilidade. Embora estas técnicas sejam relativamente simples, necessitam de pontos de medição onde é necessário a realização de furos na tubulação para tomadas de pressão, incorrendo em riscos de vazamento e interferindo no escoamento em razão da existência de descontinuidade (furos) na superfície interna da tubulação.

2.7.3 Técnicas Não Invasivas

As técnicas não invasivas podem ser classificadas em visualização (fotográfica/vídeo e óptica), atenuação da radiação e ultra-sônica.

a) Técnica de Visualização

O aspecto do escoamento visto através do tubo transparente permite o estudo de importantes parâmetros bifásicos. As técnicas de visualização permitem estudar o perfil, tamanho e velocidade das bolhas em escoamentos bifásicos.

a.1) Técnica Fotográfica/Vídeo

O aspecto do escoamento e o comportamento transiente das interfaces gás-líquido visto através do tubo transparente são importantes característica a serem estudadas. A utilização de técnicas fotográficas ou, mais recentemente, a utilização de câmeras de vídeo de alta frequência permite obter e analisar imagens dos padrões de escoamento e de suas interfaces. Lage e Esposito (1999) utilizaram a técnica fotográfica para medir diâmetros de bolhas e fração de líquido em uma coluna de borbulhamento, Bendiksen (1984) utilizou a mesma técnica para realizar uma investigação experimental de bolhas alongadas. Faccini et al. (2007) utilizaram uma câmera de alta resolução para medição do comprimento e da velocidade da bolha alongada no escoamento bifásico horizontal e Filho et al. (2009) utilizaram a mesma técnica para medir a velocidade e o perfil de bolhas alongadas no escoamento pistonado horizontal.

a.2) Técnica Óptica

As principais técnicas ópticas aplicadas em escoamentos bifásicos são a anemometria laser-Doppler (ALD) e velocimetria por imagem de partículas (VIP).

a.2.1) Anemometria Laser-Doppler (ALD)

O princípio desta técnica baseia-se no movimento relativo entre a onda (laser) emitida pelo transdutor e a onda refletida por interfaces (gás-líquido), que apresentam entre si variação de frequência. A essa variação de frequência normalmente atribui-se o nome de desvio Doppler (do inglês *Doppler shift*) ou desvio de frequência. Esta técnica não requer calibração e devido a sua alta resolução espacial e temporal tem a vantagem de obter detalhes da estrutura do escoamento. É uma técnica de medição pontual. (Freire et al., 2006)

a.2.2) Velocimetria por Imagem de Partículas (VIP)

Esta técnica consiste em iluminar uma seção do escoamento com um plano laser pulsátil onde são gravadas imagens das interfaces dispersas no fluido através de uma câmera situada perpendicularmente ao plano de luz. As imagens adquiridas são divididas em pequenas áreas chamadas regiões de interrogação. Através da correlação cruzada entre duas imagens consecutivas determina-se o deslocamento sofrido pela partícula. Esta técnica fornece dados globais do escoamento, ao contrário da ALP. (Freire et al., 2006)

Lindken e Merzkirch (2002) utilizaram a velocimetria por imagem de partículas *VLP* para medição de velocidade de bolhas no escoamento em bolhas.

As duas técnicas, *ALD* e *VIP*, necessitam para sua aplicação que o material do tubo seja transparente e não podem ser aplicadas em fluidos opacos.

a.3) Atenuação da Radiação (Raios-X, Raios Gama e Neutronografia)

a.3.1) Raios-X e Raios Gama

O princípio destas técnicas consiste na emissão de feixe de partículas de alta intensidade e na medição de sua atenuação após percorrer o fluxo bifásico. A aplicação de técnicas utilizando alto fluxo de partículas soluciona as limitações em relação à transparência do material do tubo e também da opacidade do fluido. Jones e Delhay (1976) utilizaram a técnica por raios-X juntamente com uma análise estatística para relacionar a fração de vazio com os padrões de escoamento. Heindel (2000) utilizou a técnica radiográfica instantânea (*flash X ray*) para determinar a forma e posição de bolhas em uma coluna de borbulhamento.

Sthal e von Rohr (2004) utilizaram a técnica por raios gama (fonte Iodo 125) para determinação da fração de vazio em uma mistura bifásica ar-água escoando em um tubo horizontal de acrílico de diâmetro interno 21 mm.

Quando se utiliza a técnica por raios-X ou raios gama com apenas um detector somente a primeira interface pode realmente ser observada. A fim de obter informações do perfil total do escoamento utiliza-se um conjunto de sensores que é interligado a um sistema de tomografia computadorizada, permitindo assim obter a imagem da seção transversal do escoamento. Os sistemas tomográficos solucionam este problema, mas requerem equipamentos sofisticados e mão-de-obra bastante es-

pecializada. Na tomografia o elemento emissor de radiação gira 180° em torno da região a ser estudada, sendo obtidas uma seqüência de imagens que formam o todo da região estudada. As imagens são processadas através de técnicas matemáticas.

Harvel et al. (1996) utilizaram um sistema tomográfico por raios-X para caracterizar os padrões de escoamento e medir a fração de vazio em escoamento bifásico vertical escoando em tubo anular.

Kumar et al. (1995) apresentaram um sistema tomográfico utilizando raios gama para obtenção de imagens da distribuição de vazios em escoamento bifásico.

Os raios-X e gama são idênticos do ponto de visto físico, são energia eletromagnética, porém diferem na forma que são produzidos e no nível energético. A radiação por raios-X apresenta um nível de energia menor que 100 keV e seu uso é limitado a materiais de baixa atenuação ou em tubos de pequeno diâmetro. A radiação por raios gama apresenta uma maior penetração e necessita de uma fonte de alta energia, em torno de 1 MeV, para escoamentos que ocorram grandes mudanças em sua estrutura, como no escoamento estratificado ondulado, são necessários feixes de alta intensidade. Segundo Boyer et al. (2002) o tempo de medição é diretamente dependente da atividade da fonte, na radiação por raios gama o tempo de medição em condições industriais pode demandar várias horas.

a.3.2) Neutronografia

A Neutronografia é obtida posicionando-se a amostra a ser inspecionada entre um fluxo colimado de nêutrons e um conjunto formado por um conversor de nêutrons e um sistema de imageamento. O feixe neutrônico pode provir de fontes, tais como um reator nuclear, um acelerador de partículas ou radioisotópicas.

Luiz (2007) utilizou a técnica Neutrográfica em Tempo Real para visualizar padrões de escoamento bifásico vertical em tubo de alumínio de pequeno diâmetro e da fração de vazio no escoamento slug

Takenaka et al. (1999) aplicaram a técnica da radiografia com nêutrons rápidos para determinação de baixas frações de vazio no escoamento bifásico ar-água no espaço correspondente ao arranjo de feixes tubulares 4 x 4.

a.4) Técnicas Ultra-Sônicas

As técnicas ultra-sônicas, por não serem intrusivas e, portanto não provoca-

rem mudanças no padrão de escoamento, tornam sua aplicação bastante interessante. Além disso, não necessitam de cuidados especiais de proteção para os operadores, apresentam baixo custo, podem ser utilizadas em escoamentos a alta pressão e temperatura. Em relação às técnicas ópticas tem a vantagem de poderem ser aplicadas em tubulações e recipientes de qualquer material e em fluidos opacos. Segundo Chang e Morala (1990) existem três principais técnicas ultra-sônicas para diagnósticos de parâmetros de escoamento bifásico, denominadas: Doppler (*ultrasonic shift – Doppler*), transmissão (*ultrasonic contrapropagating transmission*) e pulso-eco (*ultrasonic pulse – echo*). Estas técnicas podem ser aplicadas em escoamentos bifásicos horizontais, verticais e inclinados para medição de velocidades de fases, altura de interfaces, fração de vazio e comprimento de bolhas alongadas e outros parâmetros bifásicos.

a.4.1) Técnica Ultra-Sônica por Efeito Doppler

Segundo Masala (2004) a aplicação da técnica ultra-sônica utilizando o efeito Doppler apresenta vantagens quando é aplicada na medição das velocidades das fases gás e líquido em baixas frações de vazio. O princípio de funcionamento é o mesmo descrito anteriormente para a técnica anemotria laser-Doppler, sendo medido o desvio de frequência (Doppler shift) entre a velocidade da onda ultra-sônica emitida pelo transdutor e a refletida por interfaces dispersas no meio líquido.

Bröring et al. (1991) realizaram um estudo da estrutura do escoamento bifásico com frações de vazio de até vinte por cento em um reator piloto utilizando o método Doppler ultra-sônico. Segundo Boyer et al. (2002) na aplicação desta técnica é preciso uma focalização pontual do feixe ultra-sônico, pois a resolução espacial e a relação sinal-ruído são reduzidas à medida que se aumenta a distância do transdutor.

a.4.2) Técnica Ultra-Sônica por Transmissão

Na técnica ultra-sônica por transmissão são utilizados dois transdutores que são posicionados em lados opostos e alinhados segundo o mesmo eixo. Um transdutor emite pulsos de ondas ultra-sônicas que atravessam a parede do tubo, propagam-se através do escoamento, atravessam a parede oposta e são captados pelo segundo transdutor. Através das informações do tempo de trânsito ou da atenuação das

ondas ultra-sônicas ao longo do escoamento são obtidas informações que permitem a análise de parâmetros do escoamento.

Chang et al. (1984) utilizaram esta técnica no escoamento bifásico ar-água vertical em bolhas. Faccini et al. (2004) desenvolveram um método ultra-sônico híbrido por transmissão no escoamento bifásico ar-água horizontal.

a.4.2) Técnica Ultra-Sônica por Pulso-Eco

Nesta técnica utiliza-se apenas um transdutor que emite em intervalos periódicos pulsos de ondas ultra-sônicas que atravessam a parede do tubo, propagam-se através do escoamento, incidem sobre uma interface refletora e retornam ao transdutor pelo mesmo caminho. Da mesma forma que a técnica por transmissão, é obtido o tempo de trânsito ou da atenuação das ondas ultra-sônicas ao longo do escoamento. Através do tempo de trânsito da onda ultra-sônica é possível a determinação da posição de interfaces e através da atenuação é possível uma correlação com a fração de vazio. Conforme descrito no item deste capítulo, *Reflexão e Transmissão de Ondas*, as interfaces gás-líquido por apresentam alto coeficiente de reflexão apresentam mínima perda de energia durante a reflexão. Matikainen et al. (1986) utilizaram a técnica ultra-sônica pulso-eco para estudo do padrão de reflexão do feixe ultra-sônico sobre bolhas esféricas. Chang e Morala (1990) desenvolveram um sistema ultra-sônico para medição de parâmetros bifásicos no escoamento horizontal e vertical utilizando as técnicas por transmissão e pulso-eco.

2.8 Aplicação das Técnicas Ultra-sônicas em Escoamentos Bifásicos

Anderson (1950) desenvolveu estudos sobre o espalhamento acústico de esferas fluidas imersas em água obtendo relações entre a quantidade de energia acústica desviada por esses refletores.

Chang et al. (1984) utilizaram a técnica ultra-sônica por transmissão no escoamento vertical, padrão de bolhas ispersas, para medição da fração de vazio realizando uma simulação numérica através da aplicação de Monte Carlo. Os resultados tiveram boa concordância para fração de vazio de até vinte por cento.

Stravs e Stockar (1985b) realizaram um estudo da determinação da área interfacial e fração de vazio em uma coluna de borbulhamento utilizando a técnica ultra-sônica por transmissão a qual foi comparada com a técnica de atenuação da luz. Estes dois últimos trabalhos não estudaram a percepção das bolhas de ar pelo transdutor, nem, também, a influência da parede do tanque ou tubo onde o meio bifásico se encontrava.

Stravs e Stockar (1985a) conduziram estudos da aplicação da técnica ultra-sônica, utilizando cálculos estatísticos, para determinar diâmetros de esferas de aço imersas em água, porém não estudaram a percepção do transdutor em relação à posição das esferas nem a influência da parede do recipiente que continha o meio em estudo.

Chang e Morala (1990) desenvolveram duas técnicas ultra-sônicas, uma por transmissão aplicada em uma coluna vertical e outra por pulso-eco aplicada no escoamento horizontal. No escoamento vertical, padrão de bolhas dispersas, foram obtidas correlações relativas a atenuação do sinal ultra-sônico e medidas da velocidade de ascensão e o diâmetro médio das bolhas dispersas na condição de baixas frações de vazio. No escoamento horizontal foram realizadas medições da altura do filme de líquido, fração de vazio média e área interfacial.

Hasegawa et al. (1992) desenvolveram um estudo teórico de esferas rígidas imersas em água, desenvolvendo correlações relativas ao espalhamento acústico.

Faccini et al. (2004) usaram uma técnica híbrida, combinando as técnicas de pulso-eco e transmissão, para a identificação dos padrões e a medida da fração de vazio em escoamentos bifásicos estratificados e intermitente em uma tubulação horizontal diâmetro 50,8 *mm*.

Faccini et al. (2006) utilizaram as técnicas ultra-sônicas por pulso-eco e transmissão para medir a espessura do filme de líquido sob a bolha e a velocidade do pistão de líquido no escoamento pistonado horizontal em tubulação de diâmetro 50,8 *mm*. Utilizaram também uma câmera de alta resolução para estudo das bolhas alongadas.

Faccini. et al. (2008) utilizaram as técnicas ultra-sônicas por pulso-eco e transmissão para medição de interfaces gás-líquido em condições dinâmicas do escoamento e uma seção de modelagem numérica com formulação matemática baseadas nas equa-

ções de Navier-Stokes de médias de Reynolds e no modelo de turbulência $k - W$ (energia cinética turbulenta-taxa de dissipação turbulenta específica).

Capítulo 3

Investigação Experimental da Interação do Campo Ultra-Sônico com Esferas de Aço Imersas em Água

Este capítulo apresenta um estudo experimental da interação do campo ultra-sônico com esferas de aço imersas em água simulando bolhas de ar e resultados obtidos viando a seleção do transdutor ultra-sônico mais indicado para as condições dos escoamentos bifásicos estudados na seção de testes.

Conforme descrito no capítulo 2 o campo próximo é uma região onde ocorrem grandes instabilidades da pressão acústica, sendo por isso necessária uma investigação experimental dos sinais ultra-sônicos obtidos por objetos refletivos nessa região, também é estudo a importância da frequência e diâmetro dos transdutores utilizados em escoamentos bifásicos.

3.1 Aparato Experimental

Para realização da interação entre as esferas e o campo ultra-sônico foi construído um aparato composto de um conjunto para imersão e deslocamento das esferas em meio líquido, que através dos transdutores, foi conectado a um sistema ultra-sônico. O conjunto para imersão das esferas é constituído de um tubo de aço inoxidável AISI 316 com diâmetro interno de $52,8\text{mm}$ e espessura de parede de

2,1mm. O dispositivo para posicionamento das esferas é formado por quatro partes: (1) base para acoplamento ao tubo, (2) peça para deslocamento vertical do restante do dispositivo e das esferas, conectada a base através de rosca de passo 2,0mm, com face superior constituída de 16 divisões que possibilita deslocamentos verticais com precisão de 0,125mm, (3) peça que possibilita o deslocamento horizontal em um dois eixos e (4) parafuso fabricado em aço carbono que permite o deslocamento horizontal, perpendicular a terceira peça, através de um parafuso de passo 1,81mm (14 fios/polegada). Foram utilizadas duas esferas de aço de diâmetros 3/16" e 5/16" que foram fixadas através de uma argola na ponta do parafuso que permitia seu deslocamento horizontal ao longo da seção transversal do tubo. A figura 3.1 mostra o dispositivo de posicionamento das esferas.



Figura 3.1: Dispositivo de posicionamento das esferas.

O sistema ultra-sônico é composto por um emissor de pulso (pulser/receiver) Panametrics modelo 500PR, um osciloscópio digital (100MHz, 1,25GS/s) Tektronix modelo TD53012 e dois transdutores Panametrics: (a) modelo A541S (diâmetro 12,7mm (1/2"), frequência 5 MHz) e (b) modelo V112 (diâmetro 6,35mm - (1/4"), frequência 10MHz).

Os valores da amplitude de reflexão, da esfera e da parede de fundo, variaram de acordo com o deslocamento da esfera ao longo do eixo z (*vertical*) e do eixo horizontal y . Os pontos de início de deslocamento, ou pontos de referência, foram posicionados ao longo do eixo x e foram definidos como C_1 e ponto de percepção

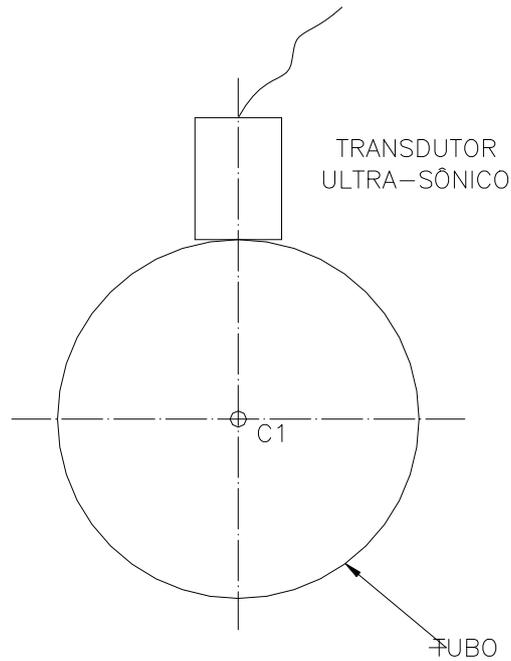
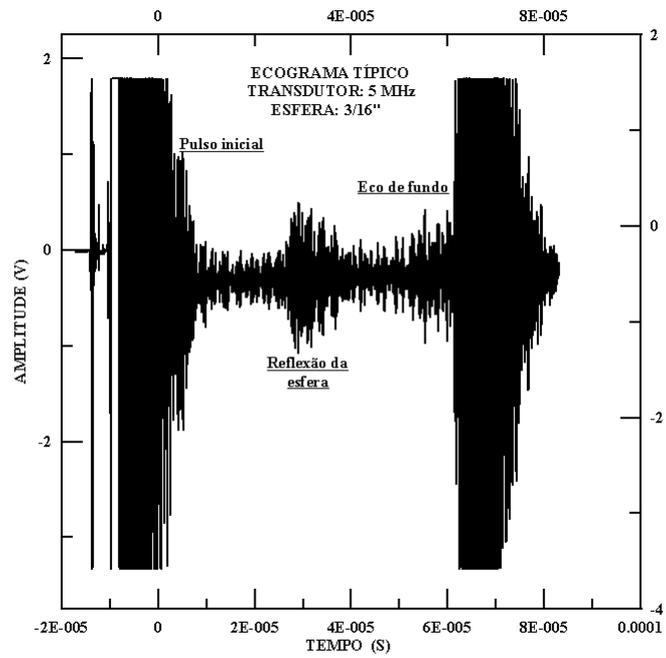


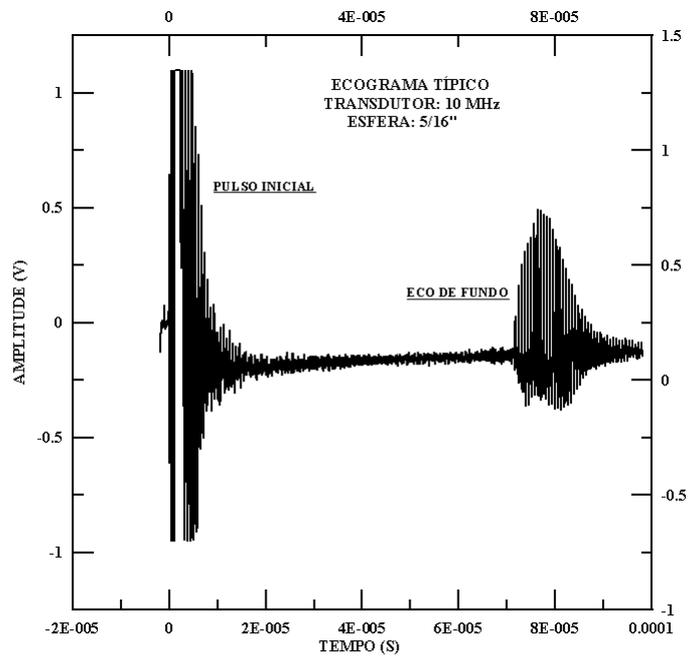
Figura 3.2: Pontos de referência.

da esfera pelo transdutor. O ponto C_1 foi posicionado no centro do tubo, ou seja, a uma distância de $26,4\text{mm}$ da parede interna do tubo. O ponto de percepção da esfera pelo transdutor não apresenta posição definida, pois se refere a pesquisa do início da zona morta (do inglês “*dead zone*”). A zona morta corresponde a uma região próxima ao transdutor onde o sistema ultra-sônico não é sensível a percepção de interfaces como, por exemplo, esferas de aço ou bolhas de ar.

O posicionamento do transdutor exigiu cuidados especiais, pois foi necessário obter a exata coincidência entre o seu eixo (eixo longitudinal do campo ultra-sônico) e o eixo da seção transversal do tubo (eixo y). A figura 3.2 apresenta os pontos de referência em relação ao posicionamento do transdutor. O tubo foi cheio com água e a esfera posicionada em um dos pontos de referência, para garantir que o feixe ultra-sônico incidisse sobre o eixo da esfera foram realizados pequenos deslocamentos nas direções dos eixos x e z até que fosse observado, através do osciloscópio, a máxima atenuação do sinal refletido pela parede oposta ao transdutor (eco de fundo).



a)



b)

Figura 3.3: Ecoogramas típicos: (a) frequência 5MHz e esfera $\phi 3/16''$; (b) frequência 10MHz e esfera $\phi 5/16''$.

3.2 Ecogramas

O estudo do campo ultra-sônico foi realizado através da construção de ecogramas e da análise dos sinais ultra-sônicos refletidos pela esfera e pela parede oposta ao transdutor (*eco de fundo*). A figura 3.3 apresenta ecogramas típicos onde o primeiro se refere a interação do campo ultra-sônico gerado pelo transdutor de $5MHz$ com a esfera de diâmetro $3/16''$ e o segundo se refere ao campo ultra-sônico gerado pelo transdutor de $10MHz$ com a esfera de diâmetro $5/16''$.

3.3 Fenômenos Observados

Múltiplas Reflexões

Ao realizar-se a análise dos sinais das ondas ultra-sônicas que retornam ao transdutor após reflexão sobre a esfera e sobre a parede oposta ao transdutor (*eco de fundo*), observou-se que estas não correspondem a um grupo de ondas em fase, mas a um grupo composto por ondas que apresentam pequenas defasagens temporais e com diferentes padrões de amplitude em razão da interação de ondas decorrentes das múltiplas reflexões da parede do tubo. A figura 3.4 apresenta as múltiplas reflexões do eco de fundo utilizando o transdutor de $5MHz$, o eixo horizontal apresenta os intervalos de tempo entre as múltiplas ondas refletidas na escala de $1\mu S$, a figura 3.5 apresenta as mesmas múltiplas reflexões, porém com intervalo de tempo correspondente a escala de $2\mu S$, as setas indicam o começo e o término dos ecos de reflexão.

De acordo com Povey (1997) este fenômeno é um tipo de “*reverberação*” que está associado a uma combinação acústica inadequada. Entende-se como “*reverberação*” ao fenômeno de geração de múltiplas ondas ultra-sônicas com pequena defasagem temporal em consequência de múltiplas reflexões. Se o meio no qual ocorrerem as múltiplas reflexões apresentar pequena espessura, como é comum em tubos, esse fenômeno se torna mais efetivo. Cada onda refletida, além da ocorrência de defasagem temporal, apresentará uma pequena redução de amplitude em consequência da atenuação durante sua propagação. Também, conforme descrito no Capítulo 2,

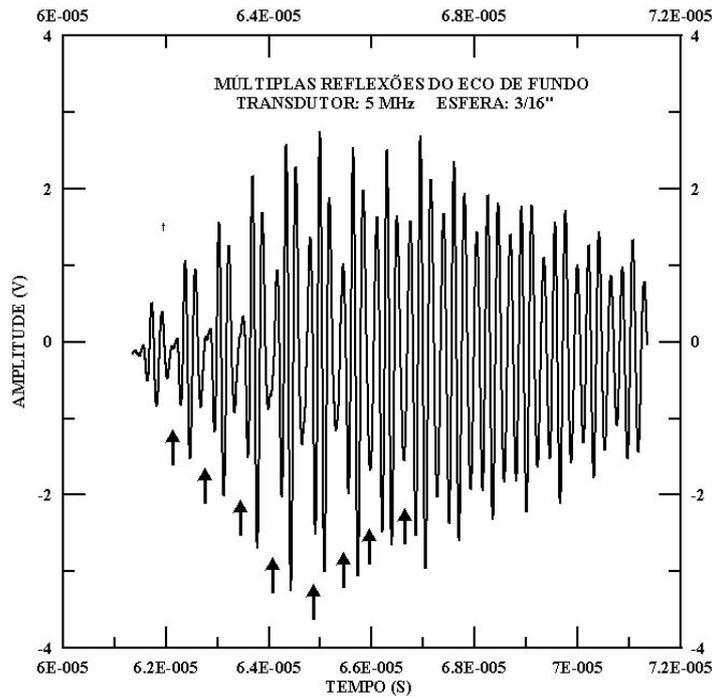


Figura 3.4: Múltiplas reflexões do eco de fundo - frequência 5MHz e intervalo de tempo de $1\mu\text{s}$.

ocorrem mudanças de fase da onda ultra-sônica, durante as múltiplas reflexões, em razão da propagação das ondas ultra-sônicas de um meio de maior impedância acústica para outro de menor de impedância. Esses dois fenômenos, múltiplas reflexões e mudança de fase, criam novas ondas ultra-sônicas que interagem com as ondas refletidas pela esfera, ou pela parede de fundo, gerando um conjunto complexo de ondas ultra-sônicas que retornam ao transdutor.

Um exemplo apresentado por Povey (1997) mostra a figura 3.6 onde múltiplas reflexões ou “*reverberação*” da onda acústica emitida, a qual inicialmente se propagou na água, incidiu sobre um pedaço de vidro de pequena espessura provocando múltiplas reflexões onde cada onda refletida apresenta uma defasagem temporal correspondente ao dobro do tempo do percurso da onda no vidro.

Ruídos

Observando os sinais captados pelos transdutores, através dos ecogramas, verificou-se que no transdutor de 5MHz ocorreram interferências de ondas ultra-

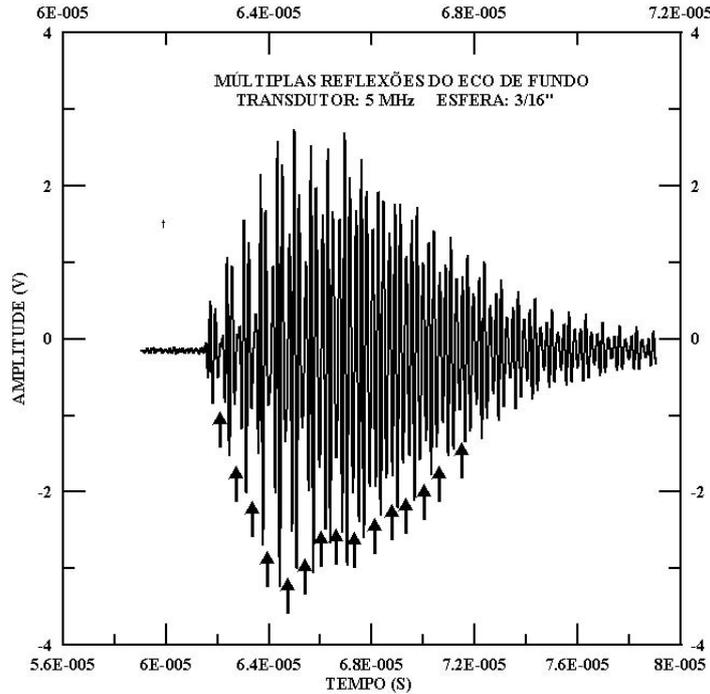


Figura 3.5: Múltiplas reflexões do eco de fundo - frequência 5MHz e intervalo de tempo de $2\mu\text{s}$.

sônicas, que dificultaram a análise e processamentos dos sinais. As interferências de ondas serão denominadas ruído. Alguns desses ruídos apresentam valores de amplitude maiores do que aqueles apresentados pela reflexão da esfera.

Parte das ondas ultra-sônicas geradas pelo transdutor não se propaga para o interior do tubo, na interface aço/água, 6,34% são transmitidas para o interior do tubo e 93,66% são refletidas, permanecendo sua propagação na parede do tubo através de múltiplas reflexões. A cada reflexão ocorre nova transmissão das ondas para o interior do tubo e uma correspondente atenuação até que ocorra a atenuação total.

Em razão da ocorrência das múltiplas reflexões e da superfície circular interna e externa do tubo, ocorrem variações do ângulo de incidência θ_1 , que ao ultrapassar o primeiro ângulo crítico acarreta na mudança de forma da onda ultra-sônica de longitudinal para transversal. Devido a sua menor velocidade e, conseqüentemente menor atenuação, a propagação de ondas ultra-sônicas transversais geram maior espalhamento, propiciando maior interferência entre as ondas e, assim mais geração

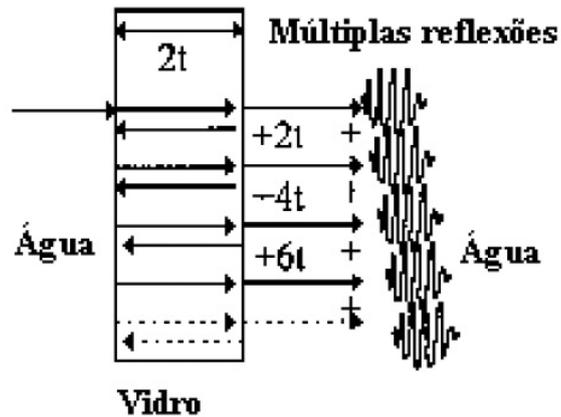


Figura 3.6: Múltiplas reflexões na parede - “Reverberação”

de ruídos.

A hipótese de que os ruídos observados nos ecogramas não eram reflexões da esfera, ou de alguma outra fonte interface, mas sim originada pela propagação de ondas ultra-sônicas longitudinais ou transversais pela parede do tubo foi confirmada utilizando o procedimento abaixo:

- A superfície externa ao tubo, próximo ao transdutor, foi coberta com vaselina, em seguida foi acoplado a superfície um meio sólido, neste experimento o dedo de um dos pesquisadores. A finalidade deste último procedimento foi desviar as ondas ultra-sônicas que se propagavam na espessura do tubo para um outro meio sólido. Observando-se em tempo real, através do osciloscópio, o ecograma no qual verificou-se a redução da amplitude dos ruídos, confirmando a hipótese. A vaselina foi utilizada como acoplante e, em razão de não apresentar alta viscosidade, não apresentou significativa influencia na atenuação dos ruídos. A figura 3.8 apresenta o ecograma com redução de ruídos e a figura 3.9 apresenta o local onde foi aplicada a vaselina,
- A vaselina foi retirada e substituída por graxa, sendo verificado uma apreciável redução das amplitudes dos ruídos. Em razão da alta viscosidade da graxa, ocorre atenuação das ondas ultra-sônicas ao se propagarem do tubo para graxa. A figura 3.10 apresenta o ecograma com redução de ruídos originada pela aplicação da graxa e a figura 3.11 apresenta o local onde a mesma foi aplicada.

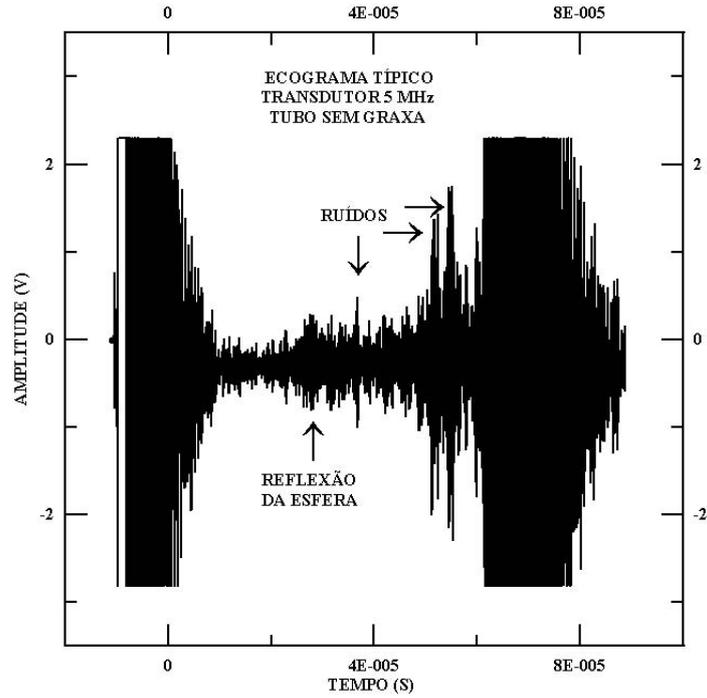


Figura 3.7: Ecograma com ocorrência de ruídos - frequência 5MHz

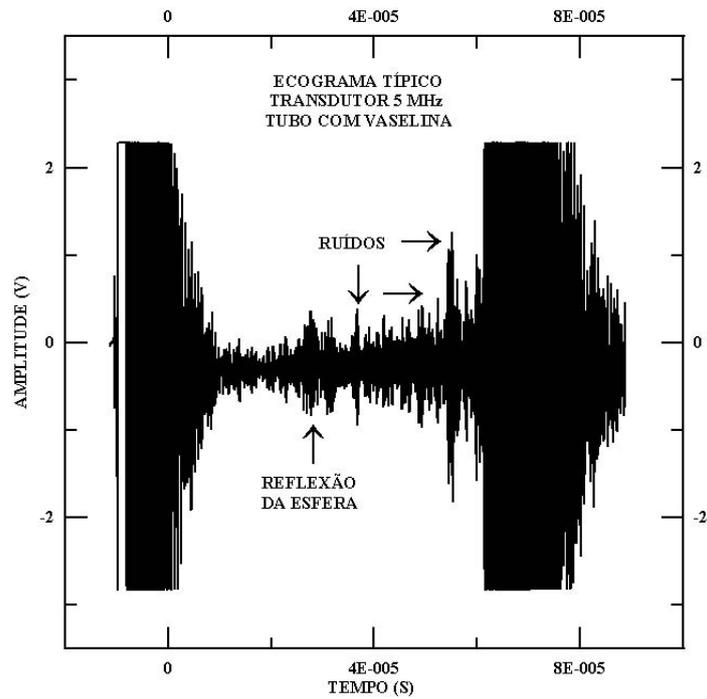


Figura 3.8: Ecograma com redução da amplitude dos ruídos após utilização de vaselina - frequência 5MHz



Figura 3.9: Local de aplicação da vaselina.

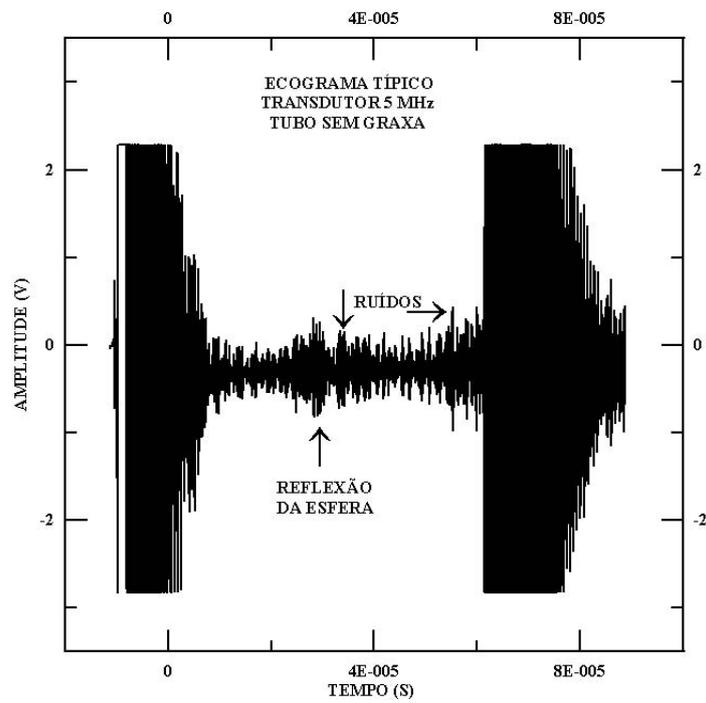


Figura 3.10: Ecograma tubo com graxa - frequência 5MHz



Figura 3.11: Local de aplicação da graxa.

O experimento descrito foi realizado com o transdutor de $5MHz$.

Os experimentos utilizando o transdutor de $5MHz$ foram realizados aplicando graxa na superfície externa do tubo.

Nos experimentos utilizando-se o transdutor de $10MHz$, verificou-se que os valores dos ruídos presentes nos ecogramas eram de baixa intensidade, não causando influência na percepção da esfera e nem dificuldades na análise e tratamento dos sinais. Conforme descrito no capítulo 2, a atenuação das ondas ultra-sônicas ocorrem pelos efeitos de absorção e dispersão. A atenuação em meios sólidos, como na espessura de parede de tubos, ocorre por dispersão e absorção da onda ultra-sônica ao incidir sobre os grãos presentes na matriz metálica. Segundo Gómez et al. (1980) a atenuação por dispersão é mais acentuada quando a relação entre o tamanho do grão e o comprimento de onda da onda ultra-sônica é da ordem de $1/10$ ou maior. Segundo Kuttruff (1991) a dimensão típica de grãos de ligas metálicas varia de $10\mu m$ a $100\mu m$, considerando o tamanho do grão do aço inoxidável na da ordem de $80\mu m$, a relação entre o tamanho do grão e o comprimento de onda da onda ultra-sônica para os transdutores de $5MHz$ e $10MHz$ são respectivamente de $0,07$ e $0,14$, portanto a atenuação por dispersão das ondas ultra-sônicas para os dois transdutores é alta. Segundo Kuttruff (1991) a atenuação por absorção é proporcional a freqüência a

quarta potência. O transdutor de maior frequência causa uma maior atenuação das ondas ultra-sônicas na parede do tubo, justificando a presença de poucos ruídos ao se utilizar o transdutor de $10MHz$ e de muitos ruídos utilizando-se o de $5MHz$.

No apêndice A1 são apresentados os resultados obtidos da interação entre os campos ultra-sônicos gerados pelos transdutores de $5MHz$ e $10MHz$ com a esfera de diâmetro $3/16''$. Também são apresentados os Campos Mortos Gerados pelos dois transdutores.

3.4 Resultados e Discussão

3.4.1 Processamento de Sinal

No processamento dos sinais foram utilizados ecogramas típicos conforme mostrado nas figuras 3.3 e 3.4, através dos quais realizou-se o processamento e análise dos sinais através do cálculo da amplitude do pico a pico e da área sob a curva do grupo de ondas refletido. A amplitude pico a pico corresponde à diferença entre as amplitudes máxima e mínima referente ao pacote de ondas refletido ou pela esfera ou pela parede interna do tubo oposta ao transdutor (eco de fundo).

A área sob a curva (amplitude versus tempo) apresenta relação com a intensidade do sinal ultra-sônico que retorna ao transdutor, expressando uma relação com interface refletora.

Durante a aquisição e registro dos sinais ocorreu à necessidade de utilização de escalas verticais diferentes do osciloscópio para melhor observação e análise dos sinais refletidos. Inicialmente foram utilizadas escalas de amplitude de baixo valor a fim de que, fosse possível a observação dos picos máximos de reflexão da onda ultra-sônica dentro da tela do osciloscópio e, como à medida que a esfera se deslocava da posição de referência, ocorria redução dos máximos valores da amplitude de reflexão, realizava-se a mudança para a escala de menor valor de maneira que a visualização do sinal dentro da tela do osciloscópio fosse ampliada. Para cada mudança de escala havia necessidade da realização de pequenos deslocamentos verticais do eixo horizontal a fim de que o pico máximo do pacote de ondas em estudo não ultrapassasse os limites inferiores e superior da tela do osciloscópio. Esse procedimento introduziu

erros de linearidade e influenciou no cálculo da área sob a curva do eco de fundo e do pulso ultra-sônico refletido pela esfera, em razão de não se ter um referencial horizontal fixo. Esses procedimentos não influenciaram no cálculo do pico a pico, pois, na verdade, esse valor corresponde à amplitude total de reflexão, porém, para cálculo da área sob a curva, foi necessário adotar um valor médio das amplitudes de reflexão de cada sinal adquirido e construir novo gráfico com apenas amplitudes positivas. As figuras 3.12 e 3.13 apresentam gráficos típicos utilizados para o cálculo da área sob a curva.

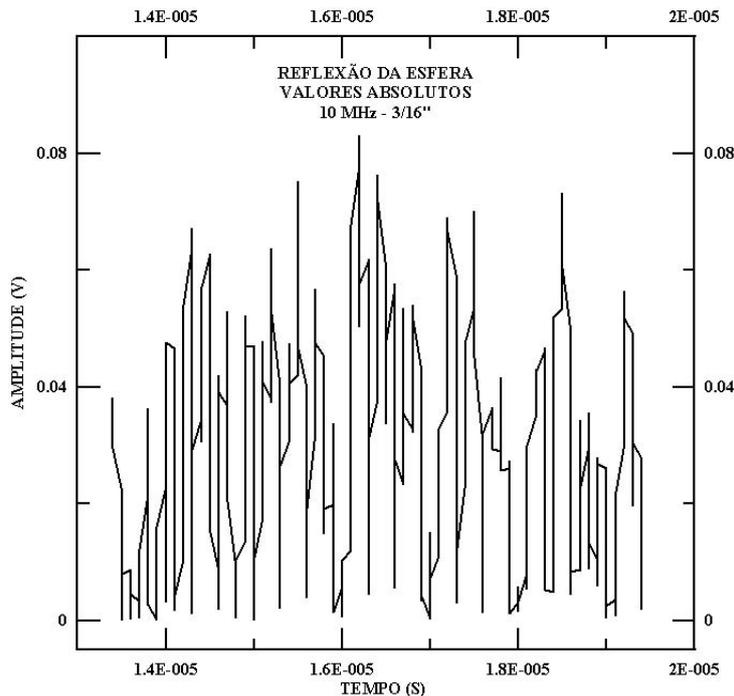


Figura 3.12: Gráfico típico com valores absolutos das amplitudes da reflexão da esfera de diâmetro 3/16”

3.4.2 Conclusões

- Os campos próximos gerados pelos transdutores de 5MHz e 10MHz cobrem todo o diâmetro do tubo de 2”, apesar de apresentarem grande instabilidade de pressão acústica, os resultados experimentais demonstraram que não afetam a análise dos sinais.

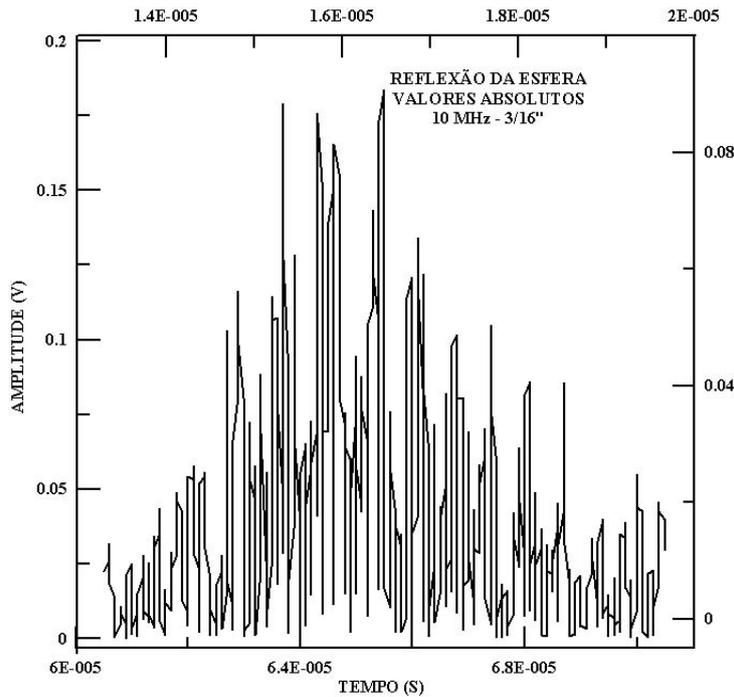


Figura 3.13: Gráfico típico com valores absolutos das amplitudes do eco de fundo utilizando-se a esfera de diâmetro 3/16”

- Múltiplas reflexões na parede do tubo ocorrem quando se utilizam tubos de aço inoxidável, como o utilizado em reatores nucleares, influenciando a análise dos sinais.
- Os transdutores de 5MHz e 10MHz geram ondas longitudinais e transversais, que se propagam e refletem na parede do tubo interagindo com as ondas que retornam ao transdutor e, assim provocando interferência nos sinais captados. Utilizando-se o transdutor de 10MHz , observa-se baixa interferência nos sinais captados. Já com o transdutor de 5MHz , observa-se grande interferência nos sinais captados, originando sinais de grandes amplitudes que não se originam de reflexões de interfaces imersas no meio líquido.
- O transdutor de 10MHz apresenta um conjunto de ondas refletidas pela esfera cujos valores de amplitude (máximo e mínimo) são facilmente identificados no ecograma, também apresenta um intervalo de tempo (início e término) facilmente identificado. O transdutor de 5MHz apresenta amplitude e intervalo

de tempo bem menores. O transdutor de 10 MHz apresenta boa percepção.

- O campo morto, do transdutor de 5MHz, ao longo do tempo, é cerca de 30% maior que o de 10MHz. A interseção entre o campo morto e a primeira frente de ondas da reflexão da esfera varia em função do transdutor e da dimensão da interface refletora.
- Para $Ka \gg 1$, como ocorrido neste experimento, as esferas são grandes comparadas com o comprimento de onda da onda ultra-sônica, ocorrendo durante a interação dos pulsos ultra-sônicos com a esfera o fenômeno da reflexão. O comprimento de onda da onda ultra-sônica na água gerada pelo transdutor de 5MHz é 0,296mm e pelo transdutor de 10MHz é 0,148mm.
- A sensibilidade utilizando a técnica ultra-sônica que analisa o eco de fundo é maior do que a analisa a reflexão da esfera. Para a esfera de diâmetro 3/16" o Ka para os transdutores de 5MHz e 10MHz são respectivamente 50,5mm e 101,1mm e para a esfera de diâmetro 5/16" o Ka para os transdutores de 5MHz e 10MHz são respectivamente 84,2mm e 168,4mm.
- Para a avaliação dos sinais refletidos por objetos refletores imersos em água pode ser utilizado o processamento dos sinais utilizando o pico a pico ou a área sob a curva.
- A esfera atenua o sinal do eco de fundo podendo assim relacionar a amplitude do eco de fundo com a fração de vazio.
- Entre os transdutores estudados o de maior frequência apresenta baixa interferência nos sinais captados e intervalos de tempo entre interfaces facilmente identificados. O transdutor de maior diâmetro gera maior campo morto. Portanto o transdutor de 10MHz e diâmetro de 1/4" fornece ao sistema ultra-sônico sinais com melhor definição.

Capítulo 4

Planta da Seção de Testes para os Padrões de Escoamento Bifásico Horizontal e Inclinado

Neste capítulo é apresentada a descrição da seção de testes horizontal e inclinada, do sistema ultra-sônico de alta velocidades e dos outros sistemas que compõem a planta para geração dos padrões bifásicos de escoamento horizontal e inclinado. Em seguida é realizada a descrição do seu funcionamento e dos principais procedimentos para operação da mesma.

4.1 Descrição Geral da Planta para Testes Bifásico Horizontal e Inclinado

Os experimentos foram realizados no laboratório de Termohidráulica Experimental do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN/CNEN). A planta para testes bifásico horizontal e inclinado é constituída por: uma seção de testes de diâmetro de 1" que permite a variação de ângulo, um sistema de alimentação e circulação de água, um sistema de alimentação de ar comprimido, um sistema ultra-sônico de alta velocidade que gera e realiza aquisição e registro dos sinais ultra-sônicos, instrumentação eletrônica para indicação e controle das variáveis de operação do

circuito de água, um sistema para aplicação da técnica de visualização e registro das imagens dos padrões de escoamentos, um sistema de iluminação aplicado ao sistema de visualização e componentes complementares como destiladores de água, tanques de expansão e de separação água-ar. A figura 4.1 mostra o diagrama do circuito de água da seção testes e a figura 4.2 mostra o desenho da planta do circuito de água.



Figura 4.1: Diagrama da planta da seção de testes

- Seção para Testes de Escoamentos Bifásicos Horizontal e Inclinado

A seção de testes bifásicos recebe a mistura bifásica através do sistema de alimentação de água e ar comprimido conectados ao misturador que permite a mistura adequada para o início do desenvolvimento dos padrões de escoamento pistonado e slug. A seção de testes permite trabalhar nas posições horizontal e inclinada com variação de ângulo de -10° a $+10^\circ$. O sistema de iluminação permite flexibilidade de intensidade e direção da luz de modo a possibilitar a melhor reflexão entre as diferentes interfaces da mistura bifásica. O sistema de visualização e registro permite uma alta taxa de aquisição de imagens de maneira a possibilitar o estudo dos parâmetros de escoamento. O sistema ultra-sônico de alta velocidade permite a emissão e registro dos sinais ultra-sônicos em tempos na ordem de milissegundo e microsegundo e assim medir variações das interfaces ar-água.

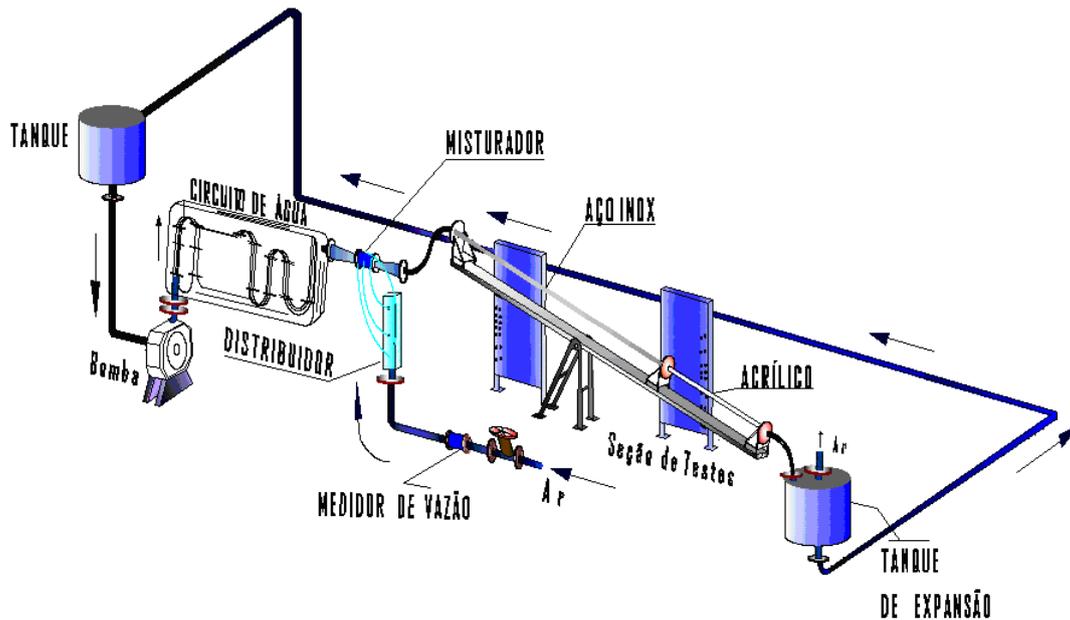


Figura 4.2: Desenho da planta da seção de testes

A seção para testes dos padrões de escoamento bifásicos ar-água horizontal e inclinado em relação a horizontal, foi projetada, fabricada e montada ao lado da seção horizontal fixa já existente, de maneira que ambas ficaram montadas em paralelo e compartilhando da instrumentação e dos demais sistemas existentes, funcionando alternadamente. A tubulação inclinada é composta de um tubo de aço inoxidável AISI 316 com $6,0m$ de comprimento, diâmetro interno de $25,6mm$ e espessura de parede de $1,5mm$, conectando-se através de um flange de PVC a um tubo de acrílico transparente com comprimento de $1,8m$, diâmetro interno $25,2mm$ e espessura de parede de $6,5mm$, portanto a seção para testes com tubo inclinado terá um comprimento total (aço mais acrílico) de $7,8m$ apresentando, então um comprimento relativo total de aproximadamente 310 vezes o diâmetro interno da tubulação. O tubo de acrílico é utilizado para visualização dos padrões de escoamento. A conexão entre o tubo de acrílico e o tubo de aço inoxidável é realizada através de flange em PVC especialmente desenvolvido para garantir vedação e reduzir esforços sobre o acrílico. A in-

terligação entre a entrada e saída da tubulação inclinada é feita através de tubo flexível reforçado de PVC que permitirá sua livre inclinação e não ficará susceptível a riscos de transmissão de vibrações que venham a influenciar no padrão de escoamento. O sistema de inclinação é composto basicamente pelas tubulações de aço inoxidável e acrílico, por cinco dispositivos de regulagem, por uma estrutura rígida formada por dois tubos quadrados soldados e por um cavalete. A figura 4.3 mostra a estrutura da seção inclinada apoiada sobre o cavalete.

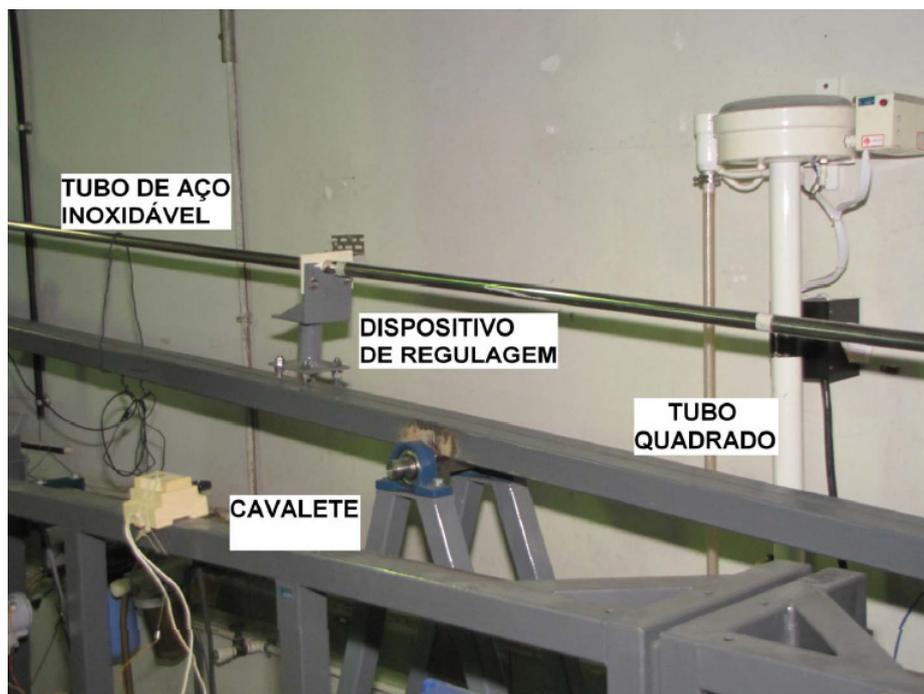


Figura 4.3: Detalhe da seção inclinada apoiada sobre o cavalete

A tubulação por onde o fluido bifásico escoava (tubos de aço inoxidável e acrílico) apoiava-se em cinco dispositivos de regulagem, que por sua vez são fixos sobre a estrutura rígida de aço, fabricada em tubo quadrado de espessura 3,0mm. Esta estrutura, próximo da metade de seu comprimento, é fixa ao cavalete, ficando todo o sistema em balanço, permitindo assim mudança do ângulo de inclinação nos dois sentidos. Para posicionamento do ângulo desejado, o sistema de inclinação é apoiado em suas extremidades em dois dispositivos de

posicionamento de ângulo.

Os dispositivos de regulagem foram fabricados de modo a permitir o ajuste fino do ângulo de inclinação da tubulação, sendo sua regulagem realizada através de quatro parafusos localizados em sua base.

O cavalete também foi construído em estrutura rígida de tubo quadrado, onde nas extremidades superiores foram montados dois mancais robustos distantes entre si de 0,2 m. Uma barra quadrada de aço inoxidável de $2\frac{1}{2}$ " sofreu processo de usinagem nas suas extremidades de modo a ser acoplada aos mancais e fixada ao sistema de inclinação, através do processo de soldagem, atuando como pivô. A seção para testes bifásicos permite trabalhar na horizontal e nos ângulos -10° , -5° , $-2,5^\circ$, $2,5^\circ$, 5° e 10° em relação a horizontal.

A montagem da seção inclinada demandou muito tempo em razão do peso de seus componentes (dispositivo de inclinação, cavalete e dispositivos de posicionamento dos ângulos), do pequeno espaço destinado à montagem e da precisão exigida na montagem de vários componentes (alinhamento, nivelamento, marcações e furações para posicionamento dos ângulos). Para ajuste fino da inclinação de cada ângulo estudado foi comprado um medidor de inclinação com resolução de $0,1^\circ$. Este mesmo medidor também foi utilizado para marcação do centro do tubo de acrílico, onde uma linha foi esticada e posicionada longitudinalmente, servindo como referência para o sistema de filmagem.

Inicialmente seria utilizado o misturador fixo já existente da seção horizontal de 2" porém, verificou-se que não produzia adequada mistura, sendo necessário construir um novo, de construção leve, na entrada da tubulação da seção inclinada, de maneira a acompanhar a mudança de inclinação.

- Sistema Ultra-Sônico de Alta Velocidade

O sistema ultra-sônico de alta velocidade foi desenvolvido no Instituto de Engenharia Nuclear pelo departamento de Instrumentação e pelo Laboratório de Termo-Hidráulica (LTE-SETER). O sistema consiste de:

- uma CPU,

- um emissor/receptor de pulsos ultra-sônicos acoplado a uma placa analógico-digital (A/D) de 100 MHz para PCI Bus que permite trabalhar com até quatro saídas multiplexadas
- quatro transdutores ultra-sônicos e
- um programa específico desenvolvido para aquisição dos sinais ultra-sônicos em alta velocidade.

A CPU utilizada tem 1 GB de memória RAM, e armazena 8000 pontos, um ponto para cada pulso ultra-sônico. A taxa de amostragem da placa é de 100 MHz e, portanto o tempo entre cada ponto consecutivo é de 10 nanosegundos. O sistema ultra-sônico efetivamente não realiza aquisições dos quatro transdutores ao mesmo tempo, porque o cartão só pode emitir um pulso por vez para cada canal de cada transdutor. O tempo decorrido entre cada pulso é cerca de 200 microssegundos, podendo ocorrer pequenas variações. Entre um ciclo de pulsos, isto é excitação dos quatro transdutores, e o ciclo seguinte, o tempo pode ser controlado através da seleção de frequências que podem variar entre 187 Hz e 940 Hz. Portanto o tempo mínimo de geração de pulsos no transdutor é 1,06 ms (940 Hz), ou seja, a cada 1,06 ms o transdutor ultra-sônico é excitado e, portanto, para quatro transdutores, o tempo de excitação entre dois transdutores consecutivos é de 265 ns. O tempo máximo de geração de pulsos no transdutor é 5,35 ms (187 Hz) (a cada 5,35 ms o transdutor ultra-sônico é excitado) Para cada pulso enviado, a placa coleta o sinal que retorna a uma taxa de 100 MHz (10 ns), então a placa A/D converte sinais analógicos em dados digitais a uma taxa de cem milhões de amostras por segundo. Um programa específico foi desenvolvido para aquisição dos sinais ultra-sônicos em alta velocidade, onde somente são registrados os sinais com tempo de trânsito menor do que o percurso do diâmetro interno do tubo. Este procedimento visa remover sinais espúrios, incluindo as múltiplas reflexões provindas da parede oposta do tubo. Não sendo assim necessário um filtro para remoção de sinais indesejáveis que exigiria uma alta capacidade de armazenamento de dados (buffer) durante a aquisição dos sinais.

O intervalo de tempo referente ao percurso da onda ultra-sônica é obtido através do intervalo de tempo entre dois pontos de referência previamente estabelecidos. Os pontos de referência são o ponto de máxima intensidade de reflexão da interface ar-água e o pulso inicial, através destes pontos o programa realiza o cálculo do tempo de propagação da onda ultra-sônica que, após processamento, fornece as alturas dos filmes de líquido.

O programa ainda permite a opção de registrar todos os ecogramas (amplitude versus tempo de propagação) e os resultados dos tempos de propagação da onda ultra-sônica no interior do tubo de cada sinal. A memória RAM da CPU armazena até 8000 ecogramas, até 2000 por transdutor. A principal característica do programa é processar dados em um intervalo de tempo muito pequeno, assim é possível obter o tempo de trânsito da onda ultra-sônica imediatamente após a aquisição do sinal. Os transdutores ultra-sônicos são do tipo monocristal da Panametrics, modelo A111S, diâmetro $12,7\text{mm}$ ($1/2''$) e frequência de 10 MHz . Trabalham no modo pulso-eco e foram selecionados especificamente para as condições de interfaces transientes ar-água, conforme descrito no capítulo 3. A figura 4.4 mostra a sala de controle onde são monitoradas as variáveis operacionais e registrados os dados experimentais.

- Sistema de Alimentação e Circulação de Água - Circuito de Água

O circuito de água consiste de uma tubulação em aço inoxidável de diâmetro interno 50 mm , ao longo da qual estão dispostas válvulas e medidores de pressão, vazão e temperatura, sendo a água impulsionada por uma bomba centrífuga de um estágio, marca KSB, modelo CPK-cm-200, faixa de vazão de $0,05\text{ l/s}$ a $9,72\text{ l/s}$, com altura manométrica máxima de 51 mca . A variação de vazão da bomba é feita através de um variador de corrente contínua, marca Baumüller Numberg, modelo GNV 132 MTE14. O monitoramento da vazão de água é realizado em dois estágios, de acordo com a faixa de vazão estudada. Na faixa de $2\text{ m}^3/\text{h}$ a $5\text{ m}^3/\text{h}$ são utilizados concomitantemente dois transmissores de vazão, um tipo turbina Thermo Measurement-Flow Automation, modelo

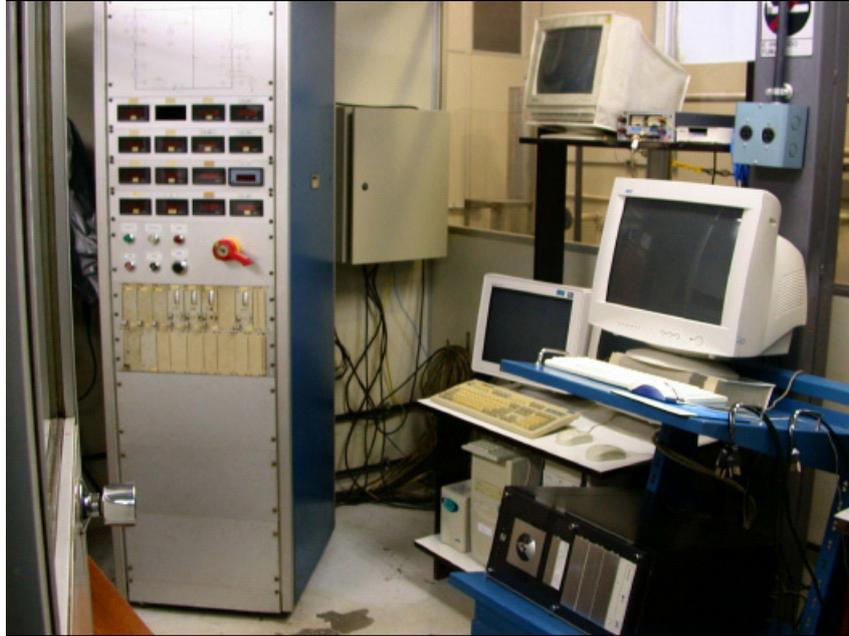


Figura 4.4: Sala de controle

6500, faixa de vazão de $2,5 \text{ m}^3/h$ a $40 \text{ m}^3/h$, precisão de $\pm 0,5\%$ do valor lido e o outro do tipo placa de orifício acoplado a um transmissor de pressão, marca Smar, modelo LD 302, faixa de vazão de zero a $40 \text{ m}^3/h$, precisão de $\pm 3\%$ do valor lido, que enviam sinais digitais para placa de controle. Na faixa de vazão de 100 l/h a 1000 l/h foi utilizado um medidor de vazão tipo rotâmetro, marca CONAUT, modelo 440. No final do circuito de água e imediatamente antes da água entrar no misturador, uma válvula tipo globo KSB, modelo ND10/16 DIN 3791, é utilizada para regulação das vazões de água.

Os principais parâmetros medidos nos experimentos foram as velocidades superficiais das fases ar e água, necessitando, portanto de atenção especial sobre a incerteza de medição dos instrumentos de medição das vazões de ar e água. A medida da vazão de ar foi realizada na pressão de $1,15 \text{ bar}$ utilizando-se rotômetros que apresentam uma incerteza de medição de $\pm 3\%$. A temperatura do ar foi medida por um termopar localizado na tubulação próxima a entrada dos rotômetros. A medida da vazão de água foi realizada a pressão de

1,15 *bar*, que em função da faixa de vazão, foi utilizada uma placa de orifício (incerteza de medição de $\pm 5\%$) ou um rotâmetro (incerteza de medição de $\pm 3\%$).

O sistema de monitoramento e registro de dados de parte da instrumentação utilizada no circuito de água é feito com tecnologia Fieldbus Foundation de automação da firma SMAR, no qual cada instrumento interligado a mesma, possui um microprocessador controlado por uma rede digital através de um sistema supervisor. Fieldbus é um sistema de comunicação digital bidirecional que interliga equipamentos inteligentes com um sistema de controle. Esse sistema possibilita, além do trabalho com dados digitais, melhoria na precisão por não necessitar de conversões analógico/ digital.

Como a água circula em um circuito fechado, ocorre seu aquecimento devido o atrito com a superfície interna da tubulação. Para evitar o rápido aquecimento da água, o controle da temperatura é realizado por um trocador de calor tipo duplo tubo, localizado imediatamente a jusante da bomba, que impede o rápido aumento da temperatura da água no circuito de água.

- Sistema de Alimentação de Ar Comprimido

O sistema é constituído por um compressor, localizado na casa de máquinas, que gera ar comprimido na pressão de 2,2 *bar*. O ar comprimido ao chegar ao laboratório passa por uma unidade de tratamento que filtra e seca o ar, marca HB Domnic-Hunter, modelo DPR 0020, evitando que impurezas como gotículas de óleo e partículas sólidas sejam incorporadas à água da seção de testes. Em seguida o ar passa por um sistema de controle de pressão constituído por um controlador de pressão FESTO, modelo LR-1/2-D-MIDI, onde a nova pressão é medida através de um manômetro do tipo Bourdon, marca Terbrasma. O controle volumétrico do ar injetado é feito por um manifold, marca FESTO, modelo GRA-1/4-B composto por quatro válvulas de agulha, permitindo assim um controle preciso da vazão de ar injetado no misturador. O monitoramento da vazão de ar é realizado através de dois medidores tipo rotâmetro montados em paralelo, utilizados de acordo com a faixa de vazão es-

tudada. Na faixa de vazão de $0,42 \text{ Nm}^3/\text{h}$ a $4,2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ é utilizado o modelo 440 da CONAUT e na faixa de vazão de $1,2 \text{ Nm}^3/\text{h}$ a $12 \text{ Nm}^3/\text{h}$ o modelo 400 da CONAUT. A figura 4.5 mostra o sistema de regulagem e monitoramento da vazão de ar comprimido, onde são vistos os rotômetros e o manifold de ar comprimido com as quatro válvulas de agulha.

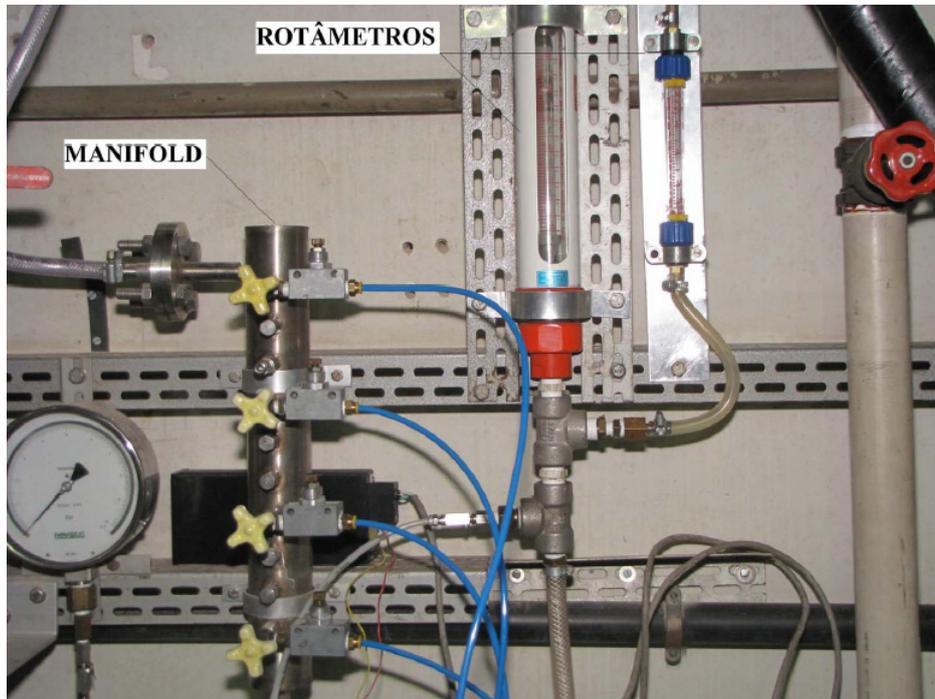


Figura 4.5: Componentes do sistema de alimentação de ar comprimido

- Instrumentação do Trocador de Calor

A instrumentação é utilizada para indicação da temperatura e pressão da água, sendo constituída por um termômetro de resistência de platina marca Hartmann & Braun, tipo Pt 100 0°C , ligado a um transmissor de temperatura tipo Fieldbus, marca SMAR, modelo TT302. A montante da válvula reguladora de vazão existe um termômetro de expansão Arma Therm e um manômetro tipo Bourdon OTA, modelo DIN 16070 que indicam a temperatura e pressão da água antes do misturador.

- Sistema de Visualização e Registro dos Padrões de Escoamento

O sistema de visualização é o da Redlake Imaging Corporation, modelo Motionscope PCI 8000S composta por uma filmadora digital monocromática de alta velocidade, modelo 1108-0014, equipada com um sensor CCD (resolução máxima 480 x 420 pixels), uma placa controladora PCI de 12 bits, um programa de aquisição e análise de imagens e um microcomputador com processador AMD K6 800 *MHz*, 128 *Mb* de memória RAM e sistema operacional Windows NT. O sistema tem capacidade para gravar imagens em preto e branco com velocidade de 50 até 8000 quadros por segundo. A visualização e registro das imagens é direcionada para a metade do comprimento longitudinal do tubo de acrílico, imediatamente após os transdutores de ultra-som, de modo a permitir a comparação entre as duas técnicas.

- Sistema de Iluminação

A iluminação adequada é primordial na aplicação da técnica de visualização de modo que se possa definir a posição e o contorno das interfaces com boa nitidez. O sistema é composto por dois refletores, um da Lowel PRO 250 W e o outro da Sargent 1000 W, também são utilizadas duas luminárias de lâmpadas fluorescentes de 20 W cobertas por papel branco translúcido para obtenção de luz difusa, sendo uma fixada na estrutura rígida de tubo quadrado, abaixo do tubo de acrílico e outra móvel, presa por fios que através de roldanas permite seu deslocamento conforme os ângulos de inclinação estudados. De acordo com as velocidades superficiais das fases, do ângulo de inclinação estudado e da taxa de aquisição de imagens são realizados os testes de iluminação utilizando-se uma ou duas luminárias até se obter a melhor definição de interfaces.

4.2 Funcionamento da Planta de Seção de Testes

A água a ser utilizada no experimento é previamente destilada, filtrada e armazenada em um tanque de aço inoxidável localizado pouco acima do circuito de água. Inicialmente a água é impulsionada do tanque de armazenamento para o circuito de água através de uma bomba centrífuga, marca Dancor, modelo KM39A, vazão de $4m^3/h$, altura manométrica máxima de 9,8 *mca* até que ocorra seu completo

enchimento. Bolhas de ar são retiradas do circuito por válvulas manuais de purga colocadas nos pontos altos da tubulação. Em seguida a bomba KSB é posta em marcha girando-se gradativamente o potenciômetro, ocorrendo o aumento de rotação do rotor e fazendo com que ocorra recirculação da água apenas pelo circuito de água. Através de um visor, observa-se a presença de pequenas bolhas de ar incorporadas à água até seu desaparecimento. Nessa primeira etapa, a água é impulsionada passando pelo um trocador de calor que mantém sua temperatura próxima de 25°C , ocorrendo também o monitoramento da temperatura, pressão e vazão realizado por sensores. Na etapa seguinte a válvula de controle de vazão de água é aberta lentamente fazendo com que a água flua para o misturador, localizado na entrada da seção inclinada, onde recebe injeção de ar comprimido proveniente do sistema de alimentação de ar comprimido, ocorrendo à homogeneização das duas fases. Após a passagem pelo misturador, a mistura bifásica escoo através da seção de testes bifásicos, por uma distância de seis metros ao longo do tubo de aço inoxidável com o objetivo de estabilizar o padrão de escoamento, em seguida passa pelo tubo transparente de acrílico onde é feita à visualização e registro de imagens do padrão de escoamento e a aquisição dos sinais ultra-sônicos. Finalmente, o fluido bifásico flui por uma mangueira flexível até chegar a um tanque atmosférico de aço inoxidável onde o ar se separa da mistura, sendo liberado livremente para a atmosfera e a água é succionada pela bomba KSB reiniciando o ciclo.

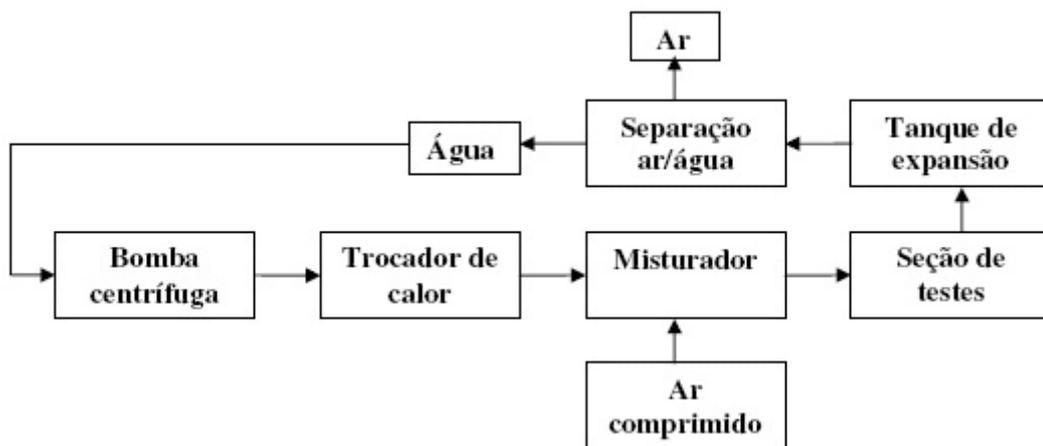


Figura 4.6: Diagrama do circuito de água.

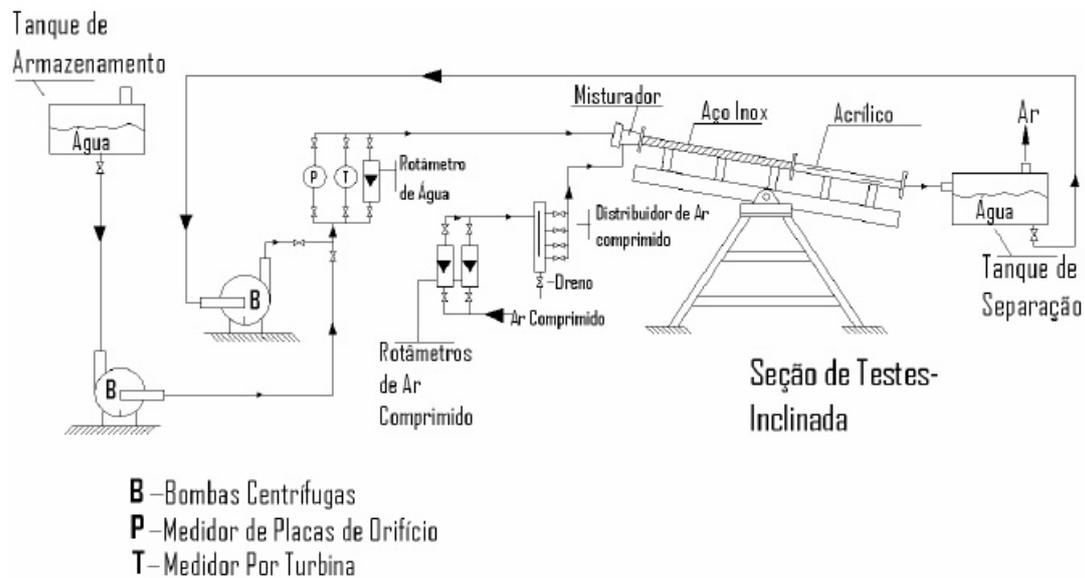


Figura 4.7: Planta do circuito de água.

Antes de iniciar a aquisição dos sinais ultra-sônicos e das imagens dos padrões de escoamento, as vazões de água e ar comprimido são cuidadosamente ajustadas e a planta é mantida com estes valores por cerca de 10 minutos para garantir que não haverá flutuações nas variáveis operacionais. A filmadora digital é posicionada de modo a obter imagens em uma faixa longitudinal do tubo de acrílico localizado na metade de seu comprimento. O ajuste da imagem requer preparo cuidadoso, pois para utilização do programa da filmadora é necessário que sua coordenada cartesiana horizontal tenha um alinhamento longitudinal ao longo do tubo de acrílico. Durante a montagem da seção de testes, utilizando um gabarito e o medidor de inclinação, foram marcados pontos no meio do tubo de acrílico e distribuídos ao longo de seu comprimento. Estes pontos serviram como guia para fixação de uma linha fina, que foi utilizada como base para posicionamento da filmadora digital e aplicação de seu programa. A seleção da taxa de aquisição de imagens está relacionada com a velocidade do escoamento e a intensidade de iluminação, de maneira a se obter nitidez das interfaces, sendo que no presente estudo foram utilizadas taxas de aquisição de 50 quadros por segundo, 125 quadros por segundo, 250 quadros por segundo e 500 quadros por segundo. No tubo de acrílico, entre o flange de entrada da mistura bifásica

e a faixa destinada a aquisição de imagens, foram acoplados quatro transdutores de ultra-sônicos. Dois na parte inferior do tubo, defasados por uma distância de 0,01 m, e dois na parte superior, defasados na mesma distância.

4.3 Partida da planta de teste e condições de operação

Inicialmente a bomba do circuito de água é acionada e a água passa a circular somente pelo circuito de água. A válvula *VT2*, localizada na entrada do circuito de água, que permite a sucção da água do tanque de expansão, e a válvula *VH3*, localizada na saída do circuito de água, que permite a saída da água para o misturador, estão fechadas. A vazão de água é gradativamente aumentada até atingir o valor de $10\text{m}^3/\text{h}$. Em seguida as válvulas *VT2* e *VH3* são abertas e a água passa a circular pela seção de testes inclinada, chegando ao tanque de expansão e retornando ao circuito de água mantendo o ciclo. Após esse procedimento, as válvulas reguladoras de vazão do sistema de ar comprimido são seqüencialmente e gradativamente abertas até que o rotâmetro de ar comprimido indique o início de passagem de ar. Realiza-se então o ajuste da vazão de água através da variação da rotação da bomba e/ou da válvula reguladora de vazão *VT2*. Por último é feito o ajuste da vazão de ar comprimido. Para cada ângulo estudado foram ajustadas três vazões de água na faixa de $0,4\text{ m}^3/\text{h}$ a $3\text{ m}^3/\text{h}$ e vazões de ar comprimido na faixa de $0,7\text{ m}^3/\text{h}$ a $1,8\text{ m}^3/\text{h}$, De maneira a se obter uma matriz 3 x 3 de pontos estudados. Os ângulos estudados foram -5° , $-2,5^\circ$, 0° , $+5^\circ$ e $+10^\circ$.

Algumas limitações ocorreram na medição das vazões de água. A menor vazão que a bomba do circuito de água pode operar é $0,2\text{ m}^3/\text{h}$. A menor vazão no qual o medidor de turbina pode operar é $2,0\text{ m}^3/\text{h}$ e a maior vazão de operação do rotâmetro de água é $1,0\text{ m}^3/\text{h}$, portanto vazões menores que $0,2\text{ m}^3/\text{h}$ e na faixa de $1,0\text{ m}^3/\text{h}$ a $1,5\text{ m}^3/\text{h}$ não puderam ser medidas.

4.3.1 Matriz dos pontos estudados

Conforme descrito anteriormente, foram relacionadas, para cada ângulo estudado três velocidades superficiais de gás com três velocidades superficiais de líquido, perfazendo uma matriz de nove pontos. Os pontos correspondentes aos pares de velocidades superficiais estudadas para cada ângulo não foram todos iguais, pois, conforme constatado nos experimentos, a região do padrão de escoamento intermitente é sensível a variação do ângulo de escoamento. No caso do padrão de escoamento descendente a escolha das velocidades superficiais é mais restrita devido à redução da região do escoamento intermitente. Também devido às variações de pressão no ponto de aquisição de sinais, as velocidades superficiais do gás apresentaram pequenas variações, mesmo mantendo-se constante a vazão do gás.

A seguir são apresentadas matrizes referentes aos pontos estudados para cada ângulo.

Tabela 4.1: Velocidades superficiais estudadas no escoamento horizontal-(m/s).

$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 0,77 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 1,59 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 1,59 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,55 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 2,07 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 2,07 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 2,01 - U_{LS} = 1,08$

Tabela 4.2: Velocidades superficiais estudadas no escoamento ascendente 5°-(m/s).

$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 0,77 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 1,59 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 1,50 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,50 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 2,02 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 2,02 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,93 - U_{LS} = 1,08$

Tabela 4.3: Velocidades superficiais estudadas no escoamento ascendente 10°-(m/s).

$U_{GS} = 0,78 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 0,77 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 0,76 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 1,52 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 1,57 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,52 - U_{LS} = 1,08$
$U_{GS} = 1,98 - U_{LS} = 0,22$	$U_{GS} = 2,00 - U_{LS} = 0,49$	$U_{GS} = 1,94 - U_{LS} = 1,08$

Tabela 4.4: Velocidades superficiais estudadas no escoamento descendente $-2,5^\circ$ (m/s).

$U_{GS} = 0,78 - U_{LS} = 1,08$	$U_{GS} = 0,77 - U_{LS} = 1,35$	$U_{GS} = 0,74 - U_{LS} = 1,62$
$U_{GS} = 1,11 - U_{LS} = 1,08$	$U_{GS} = 1,10 - U_{LS} = 1,35$	$U_{GS} = 1,03 - U_{LS} = 1,62$
$U_{GS} = 1,55 - U_{LS} = 1,08$	$U_{GS} = 1,54 - U_{LS} = 1,35$	$U_{GS} = 1,44 - U_{LS} = 1,62$

Tabela 4.5: Velocidades superficiais estudadas no escoamento descendente -5° (m/s).

$U_{GS} = 0,76 - U_{LS} = 0,81$	$U_{GS} = 0,80 - U_{LS} = 1,08$	$U_{GS} = 0,79 - U_{LS} = 1,62$
$U_{GS} = 1,50 - U_{LS} = 0,81$	$U_{GS} = 1,52 - U_{LS} = 1,08$	$U_{GS} = 1,59 - U_{LS} = 1,62$
$U_{GS} = 1,93 - U_{LS} = 0,81$	$U_{GS} = 2,02 - U_{LS} = 1,08$	$U_{GS} = 1,98 - U_{LS} = 1,62$

Capítulo 5

Procedimentos Experimentais

Neste capítulo são apresentados os procedimentos experimentais para tratamento dos sinais ultra-sônicos e das imagens para obtenção das velocidades, comprimentos e perfis longitudinais das bolhas alongadas e dos pistões de líquido.

5.1 Técnica Ultra-sônica

5.1.1 Velocidades das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido

O sistema ultra-sônico de alta velocidade foi desenvolvido para trabalhar com os transdutores no modo pulso-eco, sendo dois posicionados na parte inferior do tubo de acrílico e dois na parte superior. A figura 5.1 mostra o desenho esquemático da montagem dos transdutores ultra-sônicos e a distância entre eles. Para determinação das velocidades utiliza-se um par de transdutores posicionado na parte inferior ou superior do tubo e para determinação dos comprimentos e perfil das bolhas alongadas é necessário apenas um dos quatro transdutores, sendo que durante os tratamentos dos sinais foi dada preferência aos localizados na parte inferior em razão da maior nitidez dos sinais obtidos.

Os sinais são emitidos e captados pelos transdutores, sendo continuamente enviados para placa de aquisição que os registra em forma de planilhas. O programa do sistema ultra-sônico de alta velocidade calcula, a cada pulso, o intervalo de tempo

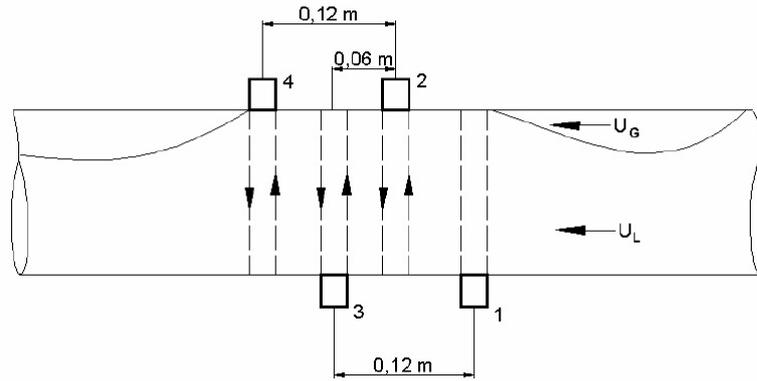


Figura 5.1: Posicionamento dos transdutores ultra-sônicos

entre a máxima reflexão da onda ultra-sônica com a interface e o ponto de referência (pulso inicial). O programa também permite uma segunda opção que é cálculo do tempo de propagação entre a amplitude máxima da primeira reflexão e a amplitude máxima da segunda reflexão. A figura 5.2 apresenta uma amostra típica de um ecograma (frame) registrado pelo sistema ultra-sônico mostrando o pulso inicial, a primeira e a segunda reflexão máxima originada pela interação da onda ultra-sônica com a interface bifásica. O intervalo de tempo entre reflexões corresponde ao tempo de propagação da onda ultra-sônica na fase líquida. O sistema ultra-sônico tem capacidade de registrar 1000 sinais por transdutor durante o intervalo de aquisição.

O escoamento bifásico intermitente é caracterizado por duas regiões principais: *a)* o pistão de líquido que contém a fase líquida e pode apresentar, dependendo das vazões das fases gás e líquido, baixa ou alta dispersão de pequenas bolhas e *b)* e a região bolha-filme que é formada pela bolha alongada na parte superior do tubo e um filme de líquido na parte inferior. A detecção da bolha alongada pelos transdutores ultra-sônicos ocorre em razão da grande diferença de impedância acústica que causa mudança do tempo de propagação da onda ultra-sônica. Então o procedimento para determinação da velocidade da bolha alongada inicia-se pela determinação do tempo inicial da primeira interface ar-água (nariz da bolha), através da mudança do tempo de propagação da onda ultra-sônica. O tempo final da passagem da bolha ocorre quando o tempo de trânsito da onda ultra-sônica no meio analisado se torna máximo.

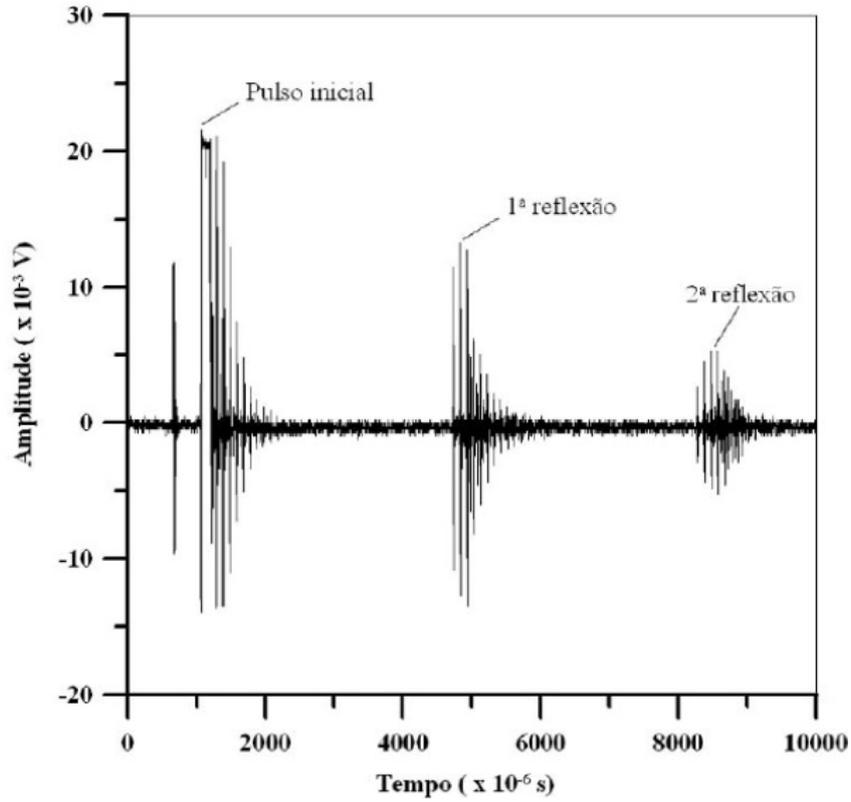


Figura 5.2: Ecograma típico registrado pelo sistema ultra-sônico de alta velocidade .

A figura 5.3 mostra um gráfico típico que apresenta o tempo de propagação da onda ultra-sônica durante o escoamento intermitente. O tempo de propagação da onda ultra-sônica Δt_Y corresponde ao tempo total de propagação da onda ultra-sônica na fase líquida da mistura bifásica no interior do tubo, ou seja, o tempo total entre a entrada da onda ultra-sônica na fase líquida, sua propagação nesse meio, reflexão em uma interface ar-água, ou na parede interna do tubo oposta ao transdutor, retorno e saída do meio líquido. A linha vermelha representa o sinal ultra-sônico do transdutor 3 e a linha azul o sinal ultra-sônico do transdutor 4.

As velocidades médias do nariz da bolha V_{NB} e da cauda da bolha V_{CB} são obtidas pelas equações:

$$V_{NB} = \sum \frac{\Delta Z}{\Delta T_{Ni}} = \sum \frac{\Delta Z}{t_i - t'_i}, \quad (5.1)$$

$$V_{CB} = \sum \frac{\Delta Z}{\Delta T_{Ci}} = \sum \frac{\Delta Z}{t_i - t'_i}, \quad (5.2)$$

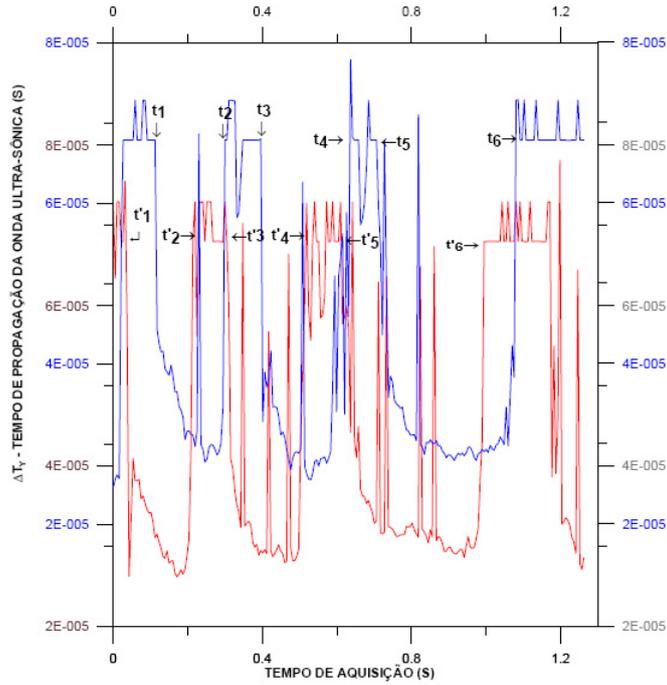


Figura 5.3: Tempos de propagação da onda ultra-sônica Δt_{γ} na fase líquida da mistura bifásica obtidas pelos transdutores 3 (vermelho) e 4 (azul)

onde:

- ΔZ é a distância entre dois transdutores. Neste trabalho utilizou-se 0,106 m,
- ΔT_{Ni} é o intervalo de tempo entre os instantes em que o nariz da bolha é detectado pelos transdutores 3 e 4. No gráfico da figura 5.3 corresponde, por exemplo, aos tempos t_1 , transdutor 4, e t'_1 , transdutor 3,
- ΔT_{Ci} é o intervalo de tempo entre os instantes em que a cauda da bolha é detectado pelos transdutores 3 e 4. No gráfico da figura 5.3 corresponde, por exemplo, aos tempos t_2 , transdutor 4, e t'_2 , transdutor 3.

A velocidade média da bolha alongada foi obtida através do cálculo da média entre as velocidades médias do nariz e da cauda, sendo expressa por:

$$V_{MB} = \sum \frac{V_{NBi} + V_{CBi}}{2}. \quad (5.3)$$

Procedimento similar foi realizado para cálculo das velocidades dos pistões de líquido, ou seja: as velocidades médias frontal do pistão de líquido V_{FPL} e a posterior V_{PPL} foram obtidas pelas equações:

$$V_{FPLi} = \sum \frac{\Delta Z}{\Delta T_{FPi}} = \sum \frac{\Delta Z}{t_i - t'_i}, \quad (5.4)$$

$$V_{PPLi} = \sum \frac{\Delta Z}{\Delta T_{PPi}} = \sum \frac{\Delta Z}{t_3 - t'_3}. \quad (5.5)$$

onde:

- ΔZ é a distância entre dois transdutores. Neste trabalho utilizou-se 0,106 m,
- ΔT_{FPi} é o intervalo de tempo entre os instantes em que a frente do pistão de líquido é detectado pelos transdutores 3 e 4. No gráfico da figura 5.3 corresponde, por exemplo, aos tempos t_2 , transdutor 4, e t'_2 , transdutor 3,
- ΔT_{PPi} é o intervalo de tempo entre os instantes em que a cauda da bolha é detectado pelos transdutores 3 e 4. No gráfico da figura 5.3 corresponde, por exemplo, aos tempos t_3 , transdutor 4, e t'_3 , transdutor 3.

A velocidade média do pistão de líquido foi obtida como a média entre as velocidades médias frontal e posterior do pistão do líquido, sendo expressa por:

$$V_{MPL} = \sum \frac{V_{FPLi} + V_{PPLi}}{2}. \quad (5.6)$$

5.1.2 Comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido

O comprimento da bolha alongada foi obtido através do produto entre a velocidade da bolha alongada V_{MB} e o intervalo de tempo decorrido entre a detecção da passagem do seu nariz pelo transdutor 3 e a detecção da passagem da sua cauda por este mesmo transdutor. Este intervalo de tempo poderia ter sido medido por qualquer um dos quatro transdutores.

O comprimento médio da bolha alongada foi obtido pela equação:

$$L_B = \sum \frac{V_{MBi} \Delta T_{Bi}}{N_i}. \quad (5.7)$$

onde:

- V_{MBi} é a velocidade média da bolha alongada,
- ΔT_B é o intervalo de tempo da passagem da bolha alongada pelo transdutor. No gráfico da figura 5.3 corresponde, por exemplo, a diferença entre os tempos t'_4 e t'_3 , do transdutor 3,
- N_i é o número de dados tratados.

O comprimento médio do pistão de líquido é obtido de maneira similar, porém utilizando o produto entre a velocidade do pistão de líquido V_{MPL} e o intervalo de tempo decorrido entre a detecção da passagem da frente do pistão de líquido pelo transdutor 3 e a detecção da passagem da sua parte posterior por este mesmo transdutor. Este intervalo de tempo pode também ser medido por qualquer um dos quatro transdutores.

O comprimento médio do pistão de líquido é obtido pela equação:

$$L_{PL} = \sum \frac{V_{MPLi} \Delta T_{PLi}}{N_i}. \quad (5.8)$$

onde:

- V_{MPLi} é a velocidade média do pistão de líquido,
- ΔT_{PLi} é o intervalo de tempo correspondente a passagem do pistão de líquido pelo transdutor. No gráfico da figura 5.3 corresponde, por exemplo, a diferença entre os tempos t'_3 e t'_2 , do transdutor 3,
- N_i é o número de dados tratados.

5.1.3 Perfis da bolha alongada

O programa do sistema ultra-sônico fornece, através de planilhas, intervalos de tempo correspondente a propagação da onda ultra-sônica no meio líquido. Esses intervalos de tempo correspondem a trajetória da onda ultra-sônica ao ser emitida pelo transdutor, incidir e refletir em uma interface, água-ar ou água-acrílico, e retornar ao transdutor. O programa já subtrai o tempo de propagação da onda ultra-sônica através da parede do tubo. Então ao multiplicar metade do tempo de propagação

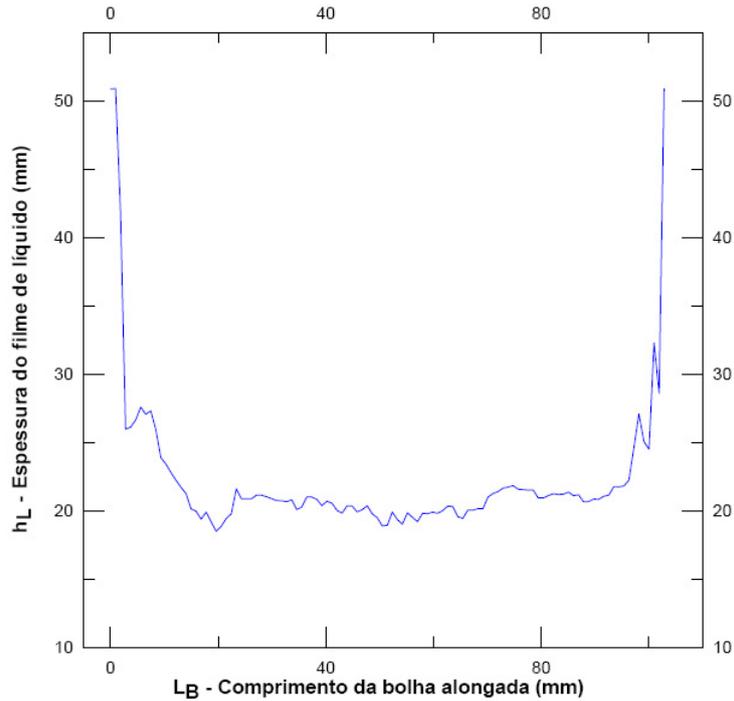


Figura 5.4: Perfil da bolha alongada

da onda ultra-sônica pela sua velocidade no meio líquido, obtém-se a espessura do filme de líquido seja na região sob a bolha alongada, seja no pistão de líquido.

A altura do filme de líquido h_L é determinada pela equação:

$$h_L = C_W \frac{\Delta T_y}{2}, \quad (5.9)$$

onde:

- C_W é a velocidade de propagação da onda ultra-sônica no meio líquido,
- ΔT_y é o tempo de propagação da onda ultra-sônica no meio líquido.

A figura 5.4 apresenta um perfil típico da bolha alongada obtido pela técnica ultra-sônica.

Através do procedimento descrito, pode-se obter separadamente os perfis longitudinais dos componentes da bolha alongada como seu nariz e cauda.

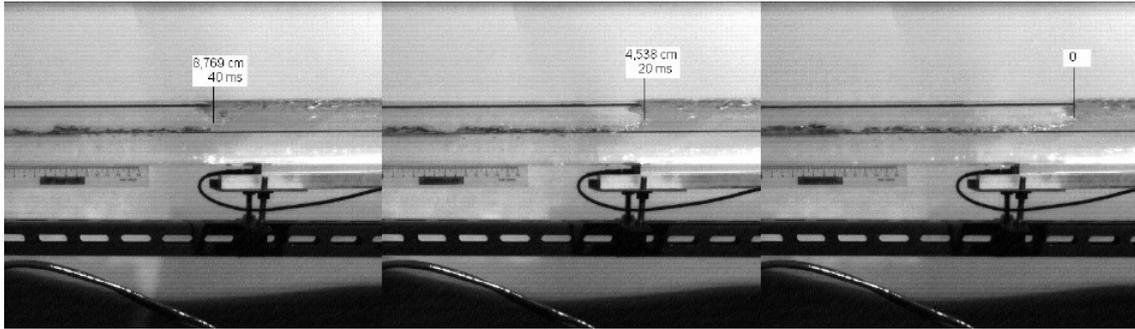


Figura 5.5: Deslocamento da interface da cauda da bolha alongada

5.2 Técnica por Visualização

Nesta seção é apresentada a descrição experimental para medição das velocidades e comprimentos das bolhas alongadas. O mesmo procedimento é utilizado para medir a velocidade e comprimento dos pistões de líquido.

Os parâmetros bifásicos medidos pela técnica por visualização foram obtidos a partir da utilização do programa de aquisição e análise de imagens do equipamento de filmagem, conforme descrito no capítulo 4. O programa apresenta um par de eixos, situados no plano de filmagem, que permite determinar a posição e a velocidade de um ponto de interesse em relação a uma referência calibrada. Dessa maneira é possível medir o deslocamento de interfaces gás-líquido localizadas no nariz, ou cauda da bolha alongada, bem como também na frente ou traseira do pistão de líquido. O procedimento de tratamento das imagens consiste em determinar um ponto de referência na interface gás-líquido, por exemplo, cauda da bolha, e à medida que os quadros forem passando é selecionado um novo ponto sobre a nova interface, assim o programa calcula o valor do deslocamento e da velocidade da interface. A figura 5.5 mostra três quadros, o quadro da direita apresenta a interface selecionada como referência e os quadros seguintes o seu deslocamento.

5.3 Análise de Incertezas

As grandezas medidas em escoamentos bifásicos, devido à alta instabilidade das interfaces são caracterizadas como mensurados extremamente variáveis e, portanto existem flutuações dos valores devido à natureza turbulenta do escoamento.

As grandezas velocidades e comprimentos da bolha alongada são calculadas indiretamente e a determinação das incertezas de parâmetros calculados indiretamente é realizado através do processo de propagação de erros. A incerteza de um resultado, U_{inc} , é função de variáveis independentes, q_i , sendo obtida através da propagação das incertezas através da equação 5.10:

$$U_{inc} = \sqrt{\sum \left(\frac{\delta f}{\delta q_i} \right)^2 U_{q_i}^2}. \quad (5.10)$$

onde:

- f é a função que relaciona o parâmetro calculado com as grandezas independentes e
- U_{q_i} é a incerteza expandida para um nível de confiança de 95%.

A incerteza expandida, U_{q_i} , é obtida pela equação:

$$U_{q_i} = t_{95\%} u_c = t_{95\%} \sqrt{\left(\frac{\Delta q_i}{\sqrt{n}} \right)^2 + \left(\frac{Res}{2\sqrt{3}} \right)^2}. \quad (5.11)$$

onde:

- $t_{95\%}$ é o fator de abrangência para o nível de confiança de 95%,
- u_c é a incerteza padrão combinada,
- Res é a resolução do instrumento ou equipamento,
- Δq_i é o desvio padrão experimental da variável, obtido pela equação 5.12:

$$\Delta q_i = \sqrt{\frac{\sum (q_i - \bar{q}_i)^2}{n - 1}}, \quad (5.12)$$

$$\bar{q}_i = \frac{\sum q_i}{n}, \quad (5.13)$$

- \bar{q}_i é o valor mensurado médio da variável q_i e
- n é o número de valores mensurados para variável q_i .

5.4 Comparação das Técnicas

O objetivo de utilizar as técnicas ultra-sônica e de visualização é garantir que os resultados obtidos pelos parâmetros bifásicos tenha confiabilidade e permita uma boa conclusão dos resultados. Para isso foram realizadas várias etapas durante o trabalho, contudo não houve tempo hábil para desenvolver o sincronismo de partida para aquisição de dados entre as técnicas ultra-sônica e de visualização, o acionamento foi realizado em instantes próximos, no entanto com alguma diferença de tempo. Os dados coletados pelas duas técnicas representam a média das condições de operação para cada ponto estudado, porém, em razão da alta instabilidade das interfaces que ocorrem durante o escoamento, os valores medidos por cada técnica representam valores quantitativos médios dos parâmetros estudados. Em relação às duas técnicas, os valores obtidos servem para uma análise qualitativa entre elas, não sendo possível afirmar qual delas apresenta maior confiabilidade dos valores medidos.

Capítulo 6

Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos das velocidades, comprimentos e perfis longitudinais das bolhas alongadas e dos pistões de líquido.

Os experimentos foram realizados dentro do padrão de escoamento bifásico intermitente correlacionando três velocidades superficiais de líquido e três velocidades superficiais de gás, perfazendo um total de nove pontos estudados. Os valores das velocidades superficiais do líquido foram mantidas constantes para os escoamentos horizontal e ascendente, já para os escoamentos descendentes, em razão de apresentarem uma menor região do padrão de escoamento intermitente, tiveram seus valores modificados. As velocidades superficiais do gás apresentaram maior variação em consequência das variações locais de pressão na região de aquisição de dados. Dessa maneira, nove pares de velocidades superficiais foram estudados para cada ângulo, conforme indicado nas tabelas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5.

A vazão volumétrica da alimentação do ar comprimido, Q_{rot} , foi medida através do rotâmetro localizado imediatamente antes do misturador, conforme descrição apresentada no sistema de alimentação de ar comprimido, capítulo 4. Utilizando-se o manômetro Terbrasma, localizado próximo ao rotâmetro, foram obtidos os valores da pressão (P_1) no rotâmetro. Através do pressostato localizado imediatamente antes da mistura bifásica passar para região do tubo de acrílico foram obtidos os valores das pressões da mistura P_2 . Considerando o escoamento isotérmico, a vazão volumétrica do gás no tubo de acrílico, Q_{acr} , é corrigida através da expressão:

$$Q_{acr} = \frac{P_1}{P_2} Q_{rot}, \quad (6.1)$$

As aquisições dos sinais ultra-sônicos e das imagens foram realizadas para um processamento médio de 10 amostras nos escoamentos horizontal ($\beta = 0^\circ$), inclinado ascendente ($\beta = 10^\circ$) e inclinado descendente ($\beta = -2,5^\circ$) e ($\beta = -5^\circ$). Para o escoamento inclinado ascendente com ângulo de inclinação ($\beta = 5^\circ$) foram realizados um processamento médio de 80 amostras, de maneira a possibilitar uma melhor análise dos resultados.

6.1 Escoamento Horizontal $\beta=0^\circ$

6.1.1 Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média da Bolha

A figura 6.1 apresenta o mapa de padrão de escoamento horizontal proposto por Mandhane et al. (1974) onde estão indicados em azul os nove pontos estudados. Também, através da técnica de visualização, foram analisados outros pontos onde observou-se os tipos de padrões de escoamento desenvolvidos que foram indicados através dos símbolos *S* (slug), *P* (pistonado) e *T* (transição).

Os valores médios das velocidades da bolha alongada, para os nove pontos estudados, foram medidos utilizando as técnicas ultra-sônica e de visualização. Esses valores, com os respectivo desvios padrões, estão indicados nas tabelas 2 e 3 do apêndice IV.

O procedimento para medir a velocidade da cauda, através das duas técnicas, apresentou maior dificuldade, quando comparado com o mesmo procedimento para medir a velocidade do nariz da bolha, em razão desta apresentar maior instabilidade na interface gás-líquido. Isto é observado através das tabelas 2 e 3 do apêndice IV onde os desvios padrões das velocidades das caudas apresentaram valores maiores.

Para análise dos desvios padrões referente aos parâmetros bifásicos estudados, serão utilizados os *coeficientes de variação* (CV), que representam a média da

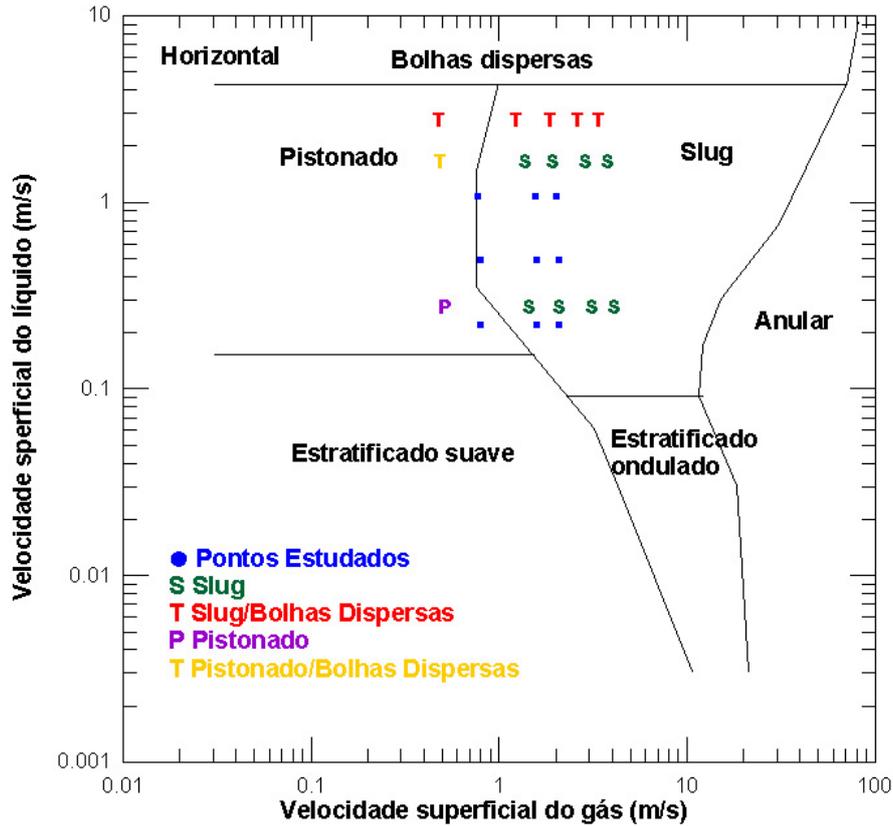


Figura 6.1: Mapa do padrão de escoamento horizontal proposto por Mandhane et al. (1974) com os pontos estudados e os observados pela técnica por visualização.

dispersão dos parâmetros medidos, expresso pela equação 6.2.

$$CV = \frac{\Delta q_i}{\bar{q}_i} 100, \quad (6.2)$$

onde:

- Δq_i é o desvio padrão,
- \bar{q}_i é o valor médio da variável.

Sendo adotado o seguinte critério para avaliação da dispersão dos valores medidos:

$CV < 15\%$ - *baixo*, $15\% \leq CV \leq 35\%$ - *médio* e $CV > 35\%$ - *alto*.

Os coeficientes de variação referente aos valores medidos da velocidade do nariz da bolha, utilizando a técnica ultra-sônica, apresentaram as seguintes variações percentuais médias:

- 10,7% a 25,6% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 8,2% a 21,6% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 14,7% a 21,0% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Enquanto que utilizando a técnica por visualização apresentaram os seguintes valores:

- 6,2% a 7,6% para a velocidade superficial de líquido de 0,22 m/s,
- 5,5% a 6,4% para a velocidade superficial de líquido de 0,49 m/s e
- 2,9% a 5,2% para a velocidade superficial de líquido de 1,08 m/s.

Portanto a técnica ultra-sônica apresentou coeficientes de variação entre baixo e médio enquanto a técnica por visualização apresentou um baixo coeficiente de variação. Da análise dos coeficientes de variação verifica-se que as duas técnicas podem ser utilizadas para estudo dos parâmetros bifásicos. O maior coeficiente de variação apresentado pela técnica ultra-sônica pode ser melhorado desenvolvendo-se no programa utilizado filtros que reduzam os ruídos dos sinais registrados.

As duas técnicas foram comparadas através da diferença relativa que é obtida através da equação 6.3 e tem como valor de referência (x_{ref}) os valores obtidos pela técnica ultra-sônica.

$$\epsilon = \frac{|x - x_{ref}|}{x_{ref}} 100, \quad (6.3)$$

As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam a comparação entre os valores medidos das velocidades do nariz da bolha alongada V_{NB} e das velocidades médias das bolhas alongadas V_{MB} obtidas pela técnica ultra-sônica e pela técnica por visualização, utilizando a diferença relativa.

Tabela 6.1: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada V_{NB} .

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,07 \text{ m/s}$
3,6%	6,8%	6,8%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,07 \text{ m/s}$
3,5%	0,6%	3,3%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,55 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,01 \text{ m/s}$
0,0%	3,1%	2,1%

Tabela 6.2: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias das velocidades do nariz e da cauda V_{MB} .

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,07 \text{ m/s}$
3,4%	4,1%	3,1%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,07 \text{ m/s}$
0,9%	9,7%	4,9%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,55 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,01 \text{ m/s}$
2,5%	0,0%	1,0%

Pela análise das tabelas verifica-se que as técnicas apresentaram valores próximos, diferença relativa máxima de 6,8% ao medir a velocidade do nariz da bolha e máxima de 9,7% ao medir a velocidade média da bolha. Indicando que para as condições do escoamento em estudo, os procedimentos utilizados nas duas técnicas são adequados.

Através das figuras 6.2 e 6.3 são analisados os comportamentos das velocidades do nariz da bolha e da velocidade média da bolha. Nestas figuras são apresentados os valores das velocidades medidos pelas duas técnicas. Para as duas figuras observa-se que mantida a velocidade superficial do líquido constante, as velocidades do nariz e a velocidade média da bolha alongada aumentam com o aumento da velocidade superficial da fase gás, indicando uma tendência de relação linear entre elas.

A intensidade da associação linear existente entre duas variáveis pode ser quantificada através do coeficiente de correlação de Pearson (r). Segundo Santos (2007) o seguinte critério pode ser adotado:

$r = 1$ - perfeita, $1 > r \geq 0,8$ - forte, $0,8 > r \geq 0,5$ - moderada e $0,5 > r \geq 0,1$ - fraca.

Os coeficientes de correlação linear para a velocidade do nariz da bolha utilizando a técnica ultra-sônica foram:

- 0,99 para a velocidade superficial de líquido de 0,22 m/s,
- 1,00 para a velocidade superficial de líquido de 0,49 m/s e
- 0,93 para a velocidade superficial de líquido de 1,08 m/s.

Em relação a velocidade média da bolha os coeficiente de correlação foram:

- 0,99 para a velocidade superficial de líquido de 0,22 m/s,
- 0,97 para a velocidade superficial de líquido de 0,49 m/s e
- 0,99 para a velocidade superficial de líquido de 1,08 m/s.

Portanto os resultados indicam uma forte dependência linear entre as variáveis medidas e a velocidade superficial do gás.

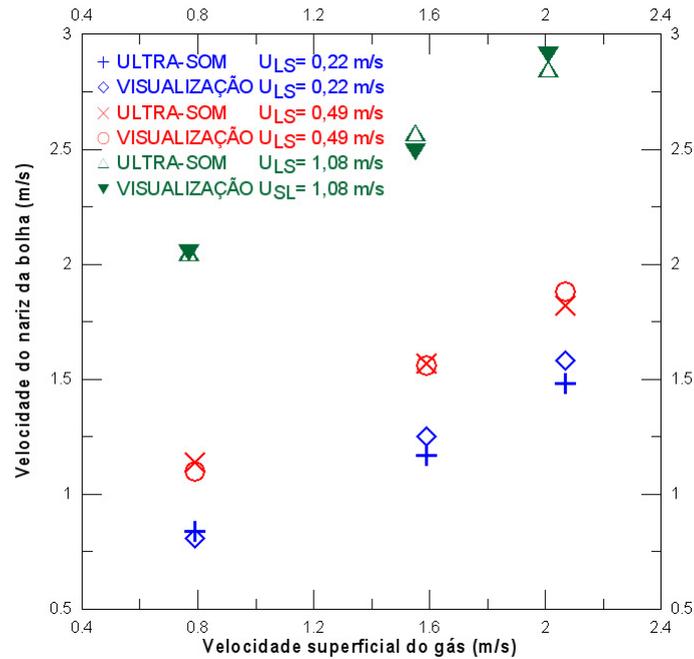


Figura 6.2: Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento horizontal.

De acordo com apud Grotjahn e Mewes (2001), a transição do escoamento pistonado para o slug, no escoamento horizontal, ocorre para a velocidade do nariz da bolha igual a $2,2 \text{ m/s}$. Observando-se o mapa de Mandhane, figura 6.1, verifica-se que a transição do escoamento pistonado para o slug ocorre quando a velocidade superficial de gás se encontra próximo de $0,8 \text{ m/s}$. Retornando a figura 6.2 observa-se que o ponto referente às velocidades superficiais de gás e líquido respectivamente de $0,77 \text{ m/s}$ e $1,08 \text{ m/s}$ (triângulo verde), apresenta a velocidade média do nariz da bolha igual a $2,05 \text{ m/s}$, coincidindo com a transição indicada no mapa de Mandhane. Conforme será visto na figura 6.43, mais a frente, neste ponto o perfil longitudinal da cauda da bolha alongada começa a apresentar desprendimento de bolhas, indicando o início do escoamento slug. Os outros dois pontos, que apresentam a mesma velocidade superficial de gás, mostram velocidades do nariz da bolha alongada bem abaixo de $2,2 \text{ m/s}$, indicando de acordo com apud Grotjahn e Mewes (2001) não serem pontos de transição, embora, de acordo com o mapa de Mandhane et al. (1974), estejam na linha de transição entre os escoamentos pistonado e slug. Na figura 6.43,

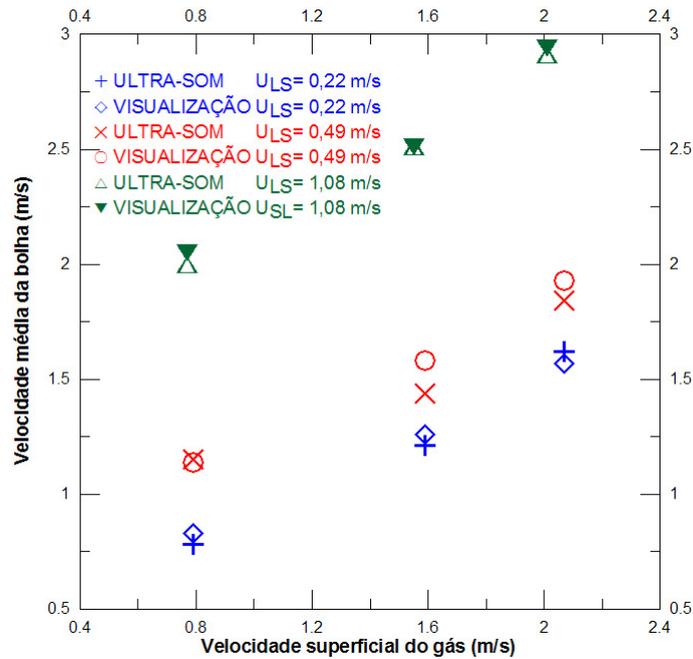


Figura 6.3: Velocidades médias da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento horizontal.

os perfis da bolha referentes às estes dois pontos não apresentam desprendimento de bolhas, indicando que ainda se encontram no escoamento pistonado.

Retornando as figuras 6.2 e 6.3 verifica-se que, mantidas as velocidades superficiais do gás constante, as velocidades do nariz e a velocidade média da bolha alongada aumentam à medida que a velocidade superficial do líquido também aumenta.

Segundo Bendiksen e Espedal (1992) a condição para o pistão de líquido crescer é que a frente da sua velocidade, V_{FPL} , seja maior que a velocidade da sua parte posterior, V_{PPL} , ocorrendo a estabilidade do pistão de líquido quando estas velocidades forem iguais. Isto é o mesmo que dizer que existirá estabilidade do pistão de líquido quando a velocidade do nariz da bolha alongada, V_{NB} , for igual à velocidade da sua cauda, V_{CB} . Portanto em um escoamento intermitente plenamente desenvolvido a bolha alongada deve apresentar mesmos valores de velocidade para o nariz e a cauda. Recorrendo as tabelas 2 e 3 do apêndice IV observa-se que há uma indicação que os escoamentos não atingiram o pleno desenvolvimento, uma vez que as médias das velocidades do nariz e da cauda não apresentaram valores iguais.

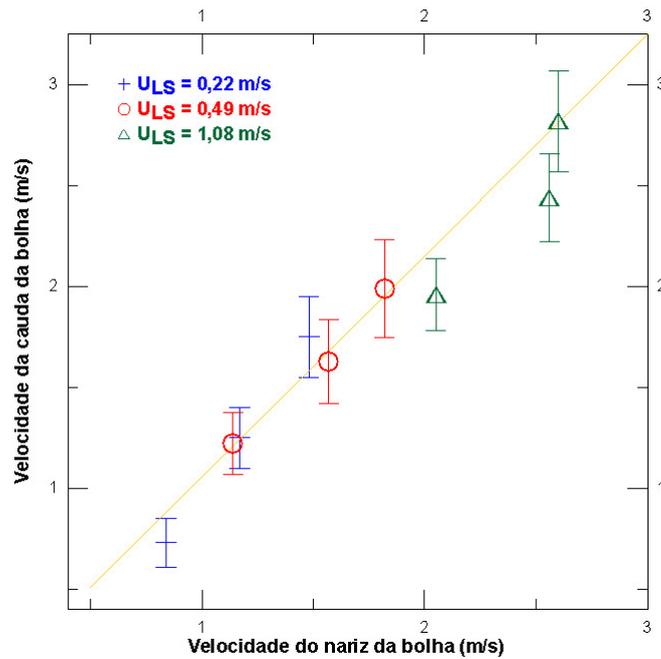


Figura 6.4: Velocidades médias da cauda da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica em função das velocidades médias do nariz da bolha alongada - Escoamento horizontal.

A figura 6.4 apresenta a comparação entre as velocidades do nariz e da cauda da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica, corroborando com a indicação de que durante a realização dos testes os escoamentos estudados não se encontravam plenamente desenvolvidos, porém próximas uma vez que os pontos se localizaram próximo a linha diagonal. As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados representam a incerteza de medição. Os transdutores ultra-sônicos e a região de visualização localizavam-se, respectivamente, a uma distância de $249Di$ e $276Di$ da entrada do misturador, indicando que, apesar de estarem relativamente distantes do misturador, a região de aquisição de dados deveria estar a uma distância um pouco maior para se alcançar o escoamento plenamente desenvolvido.

Existe na literatura correlações para cálculo da velocidade do nariz da bolha onde em um escoamento contínuo de bolhas alongadas, as correlações normalmente utilizadas fazem referência a equação 2.176.

As velocidades medidas do nariz da bolha obtidas através das técnicas ultra-sônica e por visualização foram comparadas com as correlações propostas por Cook

e Behnia (2001) e Bendiksen (1984). A tabela 6.3 apresenta os valores medidos e os obtidos pelas correlações.

Em seu trabalho, Cook e Behnia (2001) concluíram que o parâmetro empírico relativo a distribuição do perfil da velocidade do nariz da bolha (C_0), é afetado pela inclinação do escoamento e pelo diâmetro da tubulação. Os valores da velocidade do nariz da bolha alongada obtidos pela correlação proposta pelos autores representa o máximo valor que a mesma pode alcançar para um escoamento variando de 0° a 10° . Embora informem a influência do diâmetro e da inclinação do ângulo no escoamento, não contemplam essas variáveis na correlação, provavelmente em razão de terem trabalhado com uma pequena variação de ângulo e com diâmetros próximos. Segundo os autores ocorre uma transição em relação ao perfil da velocidade do escoamento quando a velocidade da mistura estiver próximo a cinco vezes a velocidade de arraste ($U_M = 5V_0 = 2,51 \text{ m/s}$). Conforme mostra a tabela 6.3, a faixa da velocidade da mistura, na qual ocorre a transição, corresponde a faixa de velocidade superficial de líquido de $1,08 \text{ m/s}$, ocorrendo a menor diferença entre os valores medidos e as correlações citadas.

Bendiksen (1984) trabalhou com diâmetros de $19,2 \text{ mm}$, $24,2 \text{ mm}$ e $50,0 \text{ mm}$, concluiu que C_0 é influenciado pelo ângulo de inclinação do escoamento, pelo número de Froude, número de Reynolds e tensão superficial, porém não considera a influência do diâmetro do tubo. Os autores consideram que ocorre uma transição no valor de C_0 quando o número de Froude do líquido atinge o valor de $3,5$, não considerando transições abaixo desse padrão. Os pontos em estudo apresentam o número de Froude do líquido bem abaixo deste valor, verifica-se pelos resultados obtidos pelas duas técnicas que não ocorre um bom ajuste com a correlação proposta por Bendiksen (1984).

Comparando as velocidades do nariz da cauda medidas pelas duas técnicas com as correlações de Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984) observa-se que as diferenças das velocidades aumentam à proporção que a velocidade superficial do gás aumenta e reduz quando a velocidade superficial do líquido diminui. O gráfico da figura 6.5, mostra uma comparação entre as duas técnicas estudadas e as correlações de Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984) para a velocidade superficial de líquido

Tabela 6.3: Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultrassônica e visualização com as correlações de Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984).

U_{GS} (m/s)	0,79	1,59	2,07
$U_{LS} = 0,22$ m/s			
U_M (m/s)	1,01	1,81	2,29
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	0,84	1,17	1,48
Visualização	0,81	1,25	1,58
Cook e Behnia (2001)	1,21	2,18	2,75
Bendiksen (1984)	1,33	2,18	2,68
$U_{LS} = 0,49$ m/s			
U_M (m/s)	1,29	2,08	2,56
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	1,14	1,57	1,82
Visualização	1,10	1,56	1,88
Cook e Behnia (2001)	1,55	2,49	3,06
Bendiksen (1984)	1,62	2,45	2,96
$U_{LS} = 1,08$ m/s			
U_M (m/s)	1,88	2,66	3,12
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	2,05	2,57	2,85
Visualização	2,05	2,49	2,91
Cook e Behnia (2001)	2,26	3,16	3,62
Bendiksen (1984)	2,25	3,06	3,55

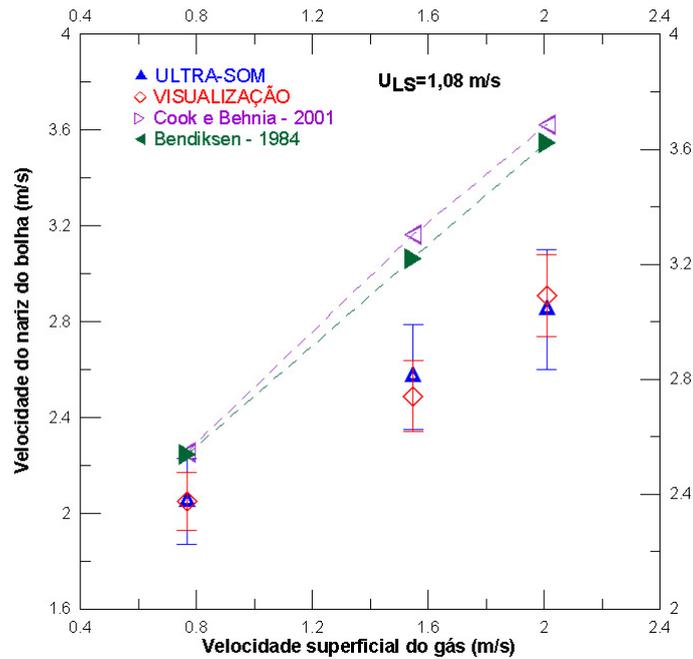


Figura 6.5: Comparação das técnicas ultra-sônica e de visualização com as correlações de Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984) para as velocidades médias do nariz da bolha alongada - Escoamento horizontal.

de 1,08 m/s. As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados representam a incerteza de medição. Em todos os pontos estudados os valores da velocidade do nariz da bolha calculados pelas correlações foram maiores que os valores medidos.

6.1.2 Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Frontal, Posterior e Média.

Os valores médios das velocidades dos componentes dos pistões de líquido estão nas tabelas 4 e 5 do apêndice IV.

O procedimento de tratamento dos dados foi sempre analisar a célula unitária, composta inicialmente pelo pistão de líquido e pela bolha alongada localizada imediatamente a sua jusante. O pistão de líquido, ou a bolha alongada, que não pertencia a uma célula unitária completa foi descartado. Tanto na técnica ultra-sônica quanto na de visualização, a velocidade posterior do pistão de líquido é igual a velocidade do nariz da bolha imediatamente a sua jusante e, na seqüência, a velocidade da cauda

da bolha alongada terá o mesmo valor da velocidade frontal do próximo pistão de líquido. Então quando for analisado um grande número de células unitárias, haverá uma aproximação entre os valores médios das velocidades dos pistões de líquido e das bolhas alongadas.

A obtenção dos valores das velocidades dos pistões de líquido é importante, pois conforme equação 5.8, o comprimento do pistão de líquido será obtido multiplicando a velocidade do pistão de líquido pela distância entre os transdutores.

Os resultados das velocidades dos pistões de líquido utilizando as duas técnicas foram comparados através da diferença relativa, tabela 6.4, verificando-se que há boa concordância entre elas. Ocorreu uma diferença máxima de 13,8%, mas na maioria dos resultados a diferença apresentou-se bem abaixo desse valor.

Tabela 6.4: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias dos pistões de líquido.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,07 \text{ m/s}$
6,2%	5,0%	11,8%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,07 \text{ m/s}$
1,8%	6,0%	2,6%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,55 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,01 \text{ m/s}$
13,8%	2,4%	1,0%

6.1.3 Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.

Os valores médios dos comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido estão nas tabelas 6 e 7 do apêndice IV.

Na literatura há pouca informação sobre comprimentos da bolha alongada e do pistão de líquido, sendo um consenso que existem grandes dispersões durante o

escoamento.

A figura 6.6 apresenta os comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pelas técnicas ultra-sônica e por visualização. Observa-se que, para velocidades superficiais de gás praticamente iguais, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do líquido diminui e, para velocidades superficiais de líquido constante, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do gás aumenta, indicando uma tendência de relação linear entre as variáveis. A relação entre os comprimentos da bolha e a velocidade superficial de gás para às velocidades superficiais de líquido de $0,22\text{ m/s}$, $0,49\text{ m/s}$ e $1,08\text{ m/s}$, medidos pela técnica ultra-sônica, apresentaram coeficientes de correlação linear respectivamente de $1,00$, $0,84$ e $0,96$.

O mesmo comportamento foi observado utilizando a técnica de visualização, apresentando os seguintes coeficientes de correlação linear: $0,96$, $1,00$ e $0,99$. O comprimento da bolha alongada relativo ao ponto de velocidades superficiais de gás e líquido respectivamente de $0,49\text{ m/s}$ e $1,59\text{ m/s}$, medido pela técnica ultra-sônica, apresentou um valor acima das tendências observadas. Os valores dos coeficientes de correlação obtidos pelas duas técnicas indicam uma forte tendência linear entre o comprimento da bolha alongada e a velocidade superficial do gás.

A figura 6.7 apresenta a variação dos comprimentos médios dos pistões de líquido, medidos pelas técnicas ultra-sônica e por visualização, em função das velocidades superficiais de gás. Os resultados não apresentaram coerência de valores nem de tendências. Segundo Dukler e Hubbard (1975) os comprimentos do pistão de líquido são relativamente insensíveis as vazões de gás e líquido. Segundo Wang et al. (2006) essa insesibilidade ocorre para velocidades superficiais de líquido acima de 6 m/s , para velocidades superficiais de líquido abaixo de $2,2\text{ m/s}$ os comprimentos dos pistões de líquido diminuem, porém os presentes resultados não corroboram com essa informação. Os resultados dos comprimentos dos pistões de líquido apresentados pelas duas técnicas podem indicar também a possibilidade de que a faixa de velocidades superficiais estudadas esteja em uma região de transição.

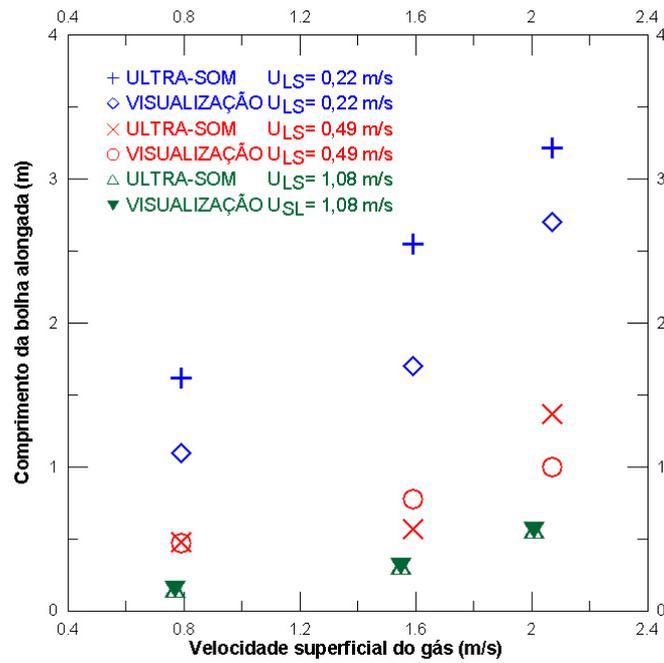


Figura 6.6: Comprimentos médios das bolhas alongadas obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento horizontal.

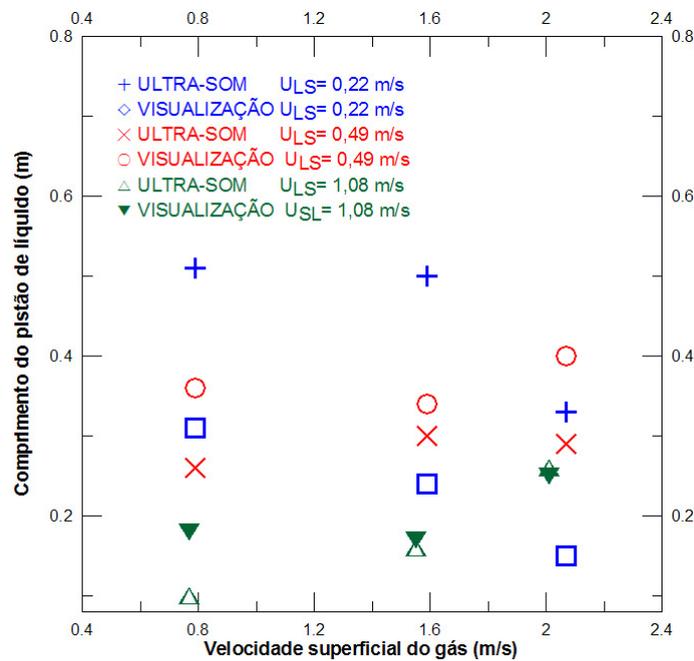


Figura 6.7: Comprimentos médios dos pistões de líquido obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás.

6.2 Escoamento Inclinado, $\beta=5^\circ$

Serão apresentados os resultados obtidos através de tabelas e gráficos, de maneira semelhante ao apresentado para o escoamento horizontal. Para este escoamento foram realizados tratamentos com número de mostras bem maior que o escoamento horizontal com o intuito de se chegar a melhores conclusões dos resultados.

A figura 6.8 apresenta um gráfico em termos de velocidades superficiais do ar e da água, obtidos na seção de testes com ângulo de inclinação de 5° , onde são indicados em azul os nove pontos estudados. Também, através da técnica de visualização, foram analisados outros pontos onde observou-se os tipos de padrões de escoamento desenvolvidos que foram representados no mapa através dos símbolos *S* (slug), *P* (pistonado) e *T* (transição).

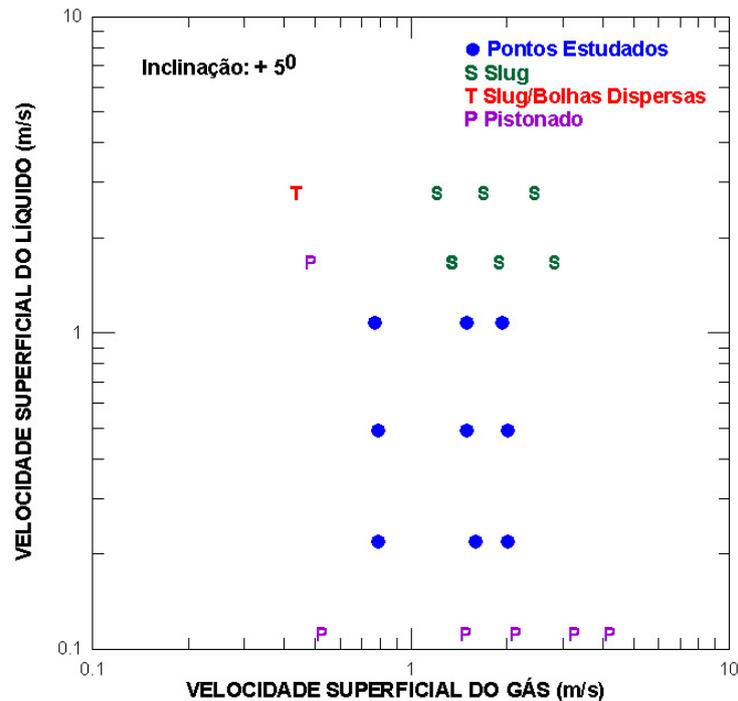


Figura 6.8: Pontos estudados e padrões de escoamento observados pela técnica por visualização - Escoamento $+5^\circ$.

6.2.1 Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média.

Os valores médios das velocidades da bolha alongada com os respectivo desvios padrões, estão indicados nas tabelas 8 e 9 do apêndice IV.

Em relação as tabelas do escoamento horizontal, as velocidades superficiais do gás apresentam pequenas variações decorrente da correção da vazão do gás que é dependente das variações da pressão no ponto de aquisição de dados.

Da mesma forma que no escoamento horizontal, os desvios padrões das velocidades das caudas, utilizando as duas técnicas, apresentaram maiores desvios padrões. Os coeficientes de variação relativo as velocidades do nariz da bolha, utilizando a técnica ultra-sônica, apresentaram as seguintes variações percentuais média:

- 11,1% a 19,4% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 12,8% a 18,5% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 10,1% a 17,3% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Enquanto que utilizando a técnica por visualização as variações percentuais médias foram:

- 4,5% a 7,0% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 3,3% a 5,1% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 3,3% a 5,1% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Conforme ocorreu no escoamento horizontal, a técnica ultra-sônica apresentou médios coeficientes de dispersão enquanto a técnica por visualização um baixo coeficiente de dispersão. Neste teste os coeficientes de dispersão, utilizando a técnica ultra-sônica, foram um pouco menores do que os observados nos testes do escoamento horizontal. Dos presentes resultados verifica-se que as duas técnicas podem ser utilizadas para as condições deste escoamento.

As tabelas 6.5 e 6.6 apresentam a comparação entre os valores medidos das velocidades do nariz da bolha alongada V_{NB} e das velocidades médias das bolhas

Tabela 6.5: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada - Escoamento +5°.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,02 \text{ m/s}$
9,9%	4,8%	1,3%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,50 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,02 \text{ m/s}$
4,3%	1,2%	10,0%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,50 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,93 \text{ m/s}$
9,5%	9,5%	9,7%

alongadas V_{MB} obtidas pela técnica ultra-sônica e pela técnica por visualização, utilizando a diferença relativa.

Os valores das velocidades obtidos pela técnica ultra-sônica e por visualização para o escoamento ascendente de 5° apresentaram valores próximos, diferença relativa máxima de 10,0% para a velocidade do nariz da bolha e máxima de 11,9% para a velocidade média da bolha. Ocorreu um pequeno aumento na diferença relativa quando comparado com o escoamento horizontal.

Através das figuras 6.9 e 6.10 são analisados os comportamentos das velocidades do nariz da bolha e da velocidade média da bolha, utilizando-se os valores das velocidades medidos pelas duas técnicas. Para as duas figuras observa-se que mantida a velocidade superficial do líquido constante, as velocidades do nariz e a velocidade média da bolha alongada aumentam com o aumento da velocidade superficial da fase gás, indicando uma tendência de relação linear entre elas. Os coeficientes de correlação linear para a velocidade do nariz da bolha, utilizando a técnica ultra-sônica, variaram entre 0,99 a 1,00 e para a velocidade média variaram entre 0,98 a 1,00, indicando também uma forte dependência linear.

Tabela 6.6: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias das médias das velocidades do nariz e da cauda - Escoamento +5°.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,02 \text{ m/s}$
9,9%	3,1%	3,1%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,50 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,02 \text{ m/s}$
11,9%	5,3%	6,3%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,50 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,93 \text{ m/s}$
8,0%	7,0%	11,4%

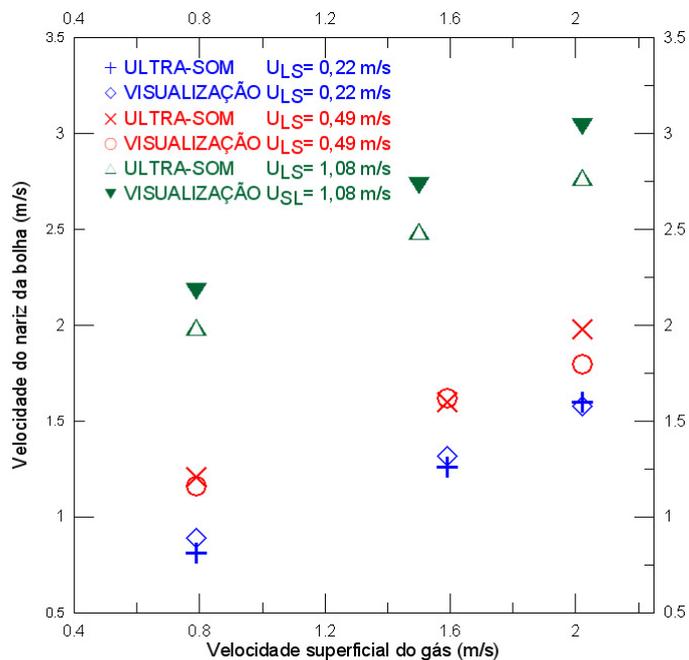


Figura 6.9: Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento +5°.

Para verificar a condição de escoamento plenamente desenvolvido, foi plotado o gráfico da figura 6.11, relacionando os valores medidos das velocidades do nariz da bolha alongada com a velocidade da sua cauda obtidas pela técnica ultra-sônica. As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados representam a incerteza de medição. Como nestes testes foi tratado um grande número de amostras, observa-se que os testes realizados nesta inclinação, não estavam plenamente desenvolvidos, porém próximos, uma vez que os pontos estudados se localizaram próximos à linha diagonal. Há uma indicação que seria necessário aumentar o comprimento da tubulação da seção de testes para se obter a estabilidade do escoamento.

As velocidades do nariz da bolha medidas pelas técnicas ultra-sônica e por visualização foram comparadas com as correlações porpostas por Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984), sendo seus valores apresentados na tabela 6.7. Na mais alta velocidade superficial de líquido as diferenças relativas entre os valores medidos pelas duas técnicas e os valores obtidos pelas correlações foram menores, enquanto que na mais baixa velocidade superficial de líquido as diferenças foram maiores. Mantida a velocidade superficial de líquido constante e aumentando a velocidade superficial do gás, ocorre um pequeno aumento nas diferenças entre os valores medidos pelas duas técnicas e os obtidos pelas correlações. Não se verificou influência da velocidade de transição ($U_M = 5V_0 = 2,51m/s$), apresentada por Cook e Behnia (2001), nos resultados obtidos. A figura 6.12 apresenta os valores da velocidade do nariz da bolha medidos pela técnica ultra-sônica e obtidos pela correlação de Bendiksen (1984). As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados representam a incerteza de medição. Em todos os pontos estudados, as velocidades do nariz da bolha obtidas pelas correlações foram maiores do que as obtidas pelas duas técnicas.

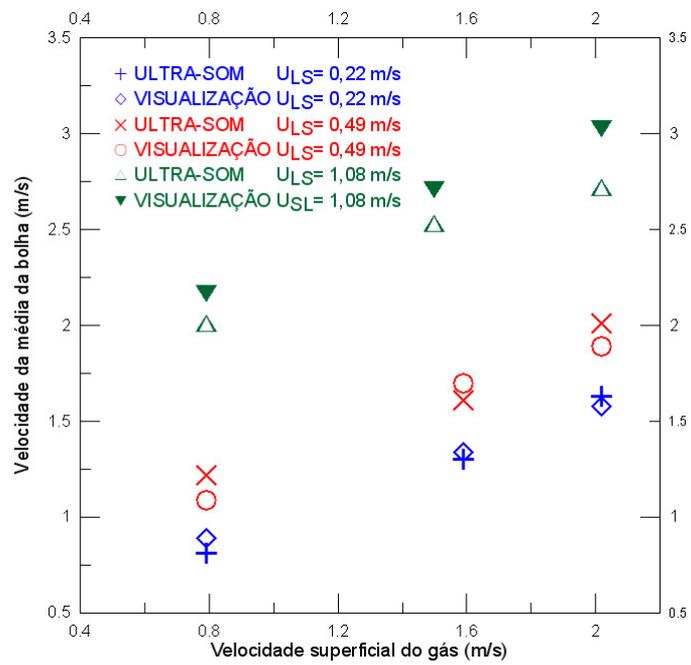


Figura 6.10: Velocidades médias da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento +5°.

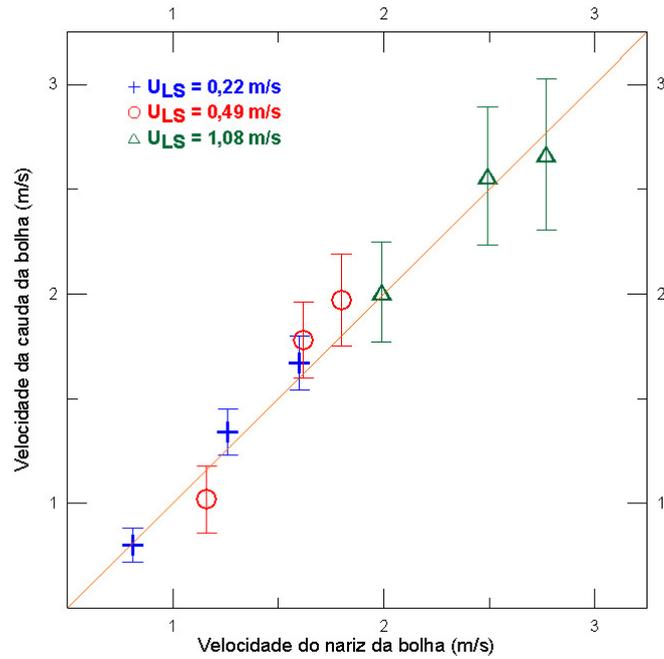


Figura 6.11: Velocidades médias da cauda da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica em função das velocidades médias do nariz da bolha alongada - Escoamento $+5^\circ$.

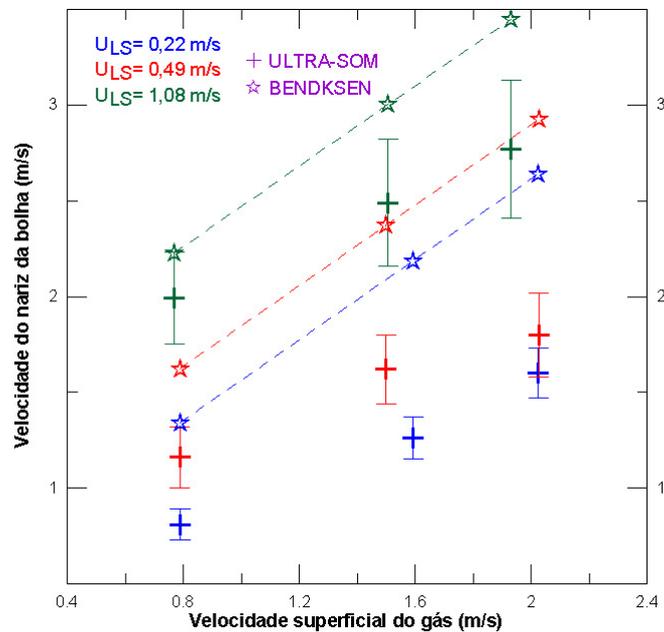


Figura 6.12: Velocidades do nariz da bolha obtidas pela técnica ultra-sônica e pela correlação de Bendiksen (1984) - Escoamento $+5^\circ$.

Tabela 6.7: Comparação entre as velocidades do nariz medidas pelas técnicas ultrassônica e visualização com as correlações de Cook e Behnia (2001) e Bendiksen (1984).

U_{GS} (m/s)	0,79	1,59	2,02
$U_{LS} = 0,22$ m/s			
U_M (m/s)	1,00	1,81	2,24
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	0,81	1,26	1,60
Visualização	0,89	1,32	1,58
Cook e Behnia (2001)	1,51	2,31	2,74
Bendiksen (1984)	1,34	2,19	2,64
U_{GS} (m/s)	0,79	1,50	2,03
$U_{LS} = 0,49$ m/s			
U_M (m/s)	1,27	1,98	2,51
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	1,16	1,62	1,80
Visualização	1,21	1,60	1,98
Cook e Behnia (2001)	1,77	2,49	3,01
Bendiksen (1984)	1,62	2,37	2,92
U_{GS} (m/s)	0,77	1,51	1,93
$U_{LS} = 1,08$ m/s			
U_M (m/s)	1,88	2,66	3,12
V_{NB} (m/s)			
Ultra-Som	1,99	2,49	2,77
Visualização	2,18	2,73	3,04
Cook e Behnia (2001)	2,35	3,10	3,61
Bendiksen (1984)	2,23	3,06	3,45

6.2.2 Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Frontal, Posterior e Média.

Os valores médios das velocidades dos componetes dos pistões de líquido estão nas tabelas 10 e 11 do apêndice IV.

Comparando as velocidades médias dos pistões de líquido V_{MPL} medidas pelas duas técnicas através da diferença relativa, tabela 6.8, verifica-se que nas mais altas velocidades superficiais de líquido ocorrem as maiores diferenças relativas. Comparando a média dos valores apresentados por esta tabela com a média dos valores apresentados na tabela 6.4, escoamento horizontal, a diferença entre as técnicas aplicadas neste escoamento foi um pouco maior, mas ainda indicando boa concordância entre elas.

Tabela 6.8: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias dos pistões de líquido (V_{MPL})- Escoamento $+5^\circ$.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,59 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,02 \text{ m/s}$
10,0%	1,5%	1,9%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,79 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,50 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,02 \text{ m/s}$
20,8%	13,9%	13,0%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,50 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,93 \text{ m/s}$
21,2%	18,3%	24,2%

6.2.3 Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.

A figura 6.13 apresenta a variação dos comprimentos médios das bolhas alongadas obtidas pelas técnicas ultra-sônica e por visualização, observa-se que para as maiores velocidade superficiais de líquido os resultados apresentaram melhor con-

cordância.

Analisando o comportamento do comprimento da bolha alongada, verifica-se que conforme ocorreu no escoamento horizontal, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do gás aumenta indicando também uma tendência de correlação linear entre as variáveis. A variação do comprimento da bolha alongada em função da velocidade superficial do gás, para as três velocidades superficiais de líquido estudada, apresentaram coeficientes de correlação linear igual a 0,99.

Na maior velocidades superficial de líquido o gradiente de crescimento do comprimento da bolha alongada é menor, verificando-se o aumento do gradiente à medida que a velocidade superficial do líquido diminui. Conforme também foi observado no escoamento horizontal, o comprimento da bolha alongada diminui a proporção que a velocidade superficial do líquido aumenta.

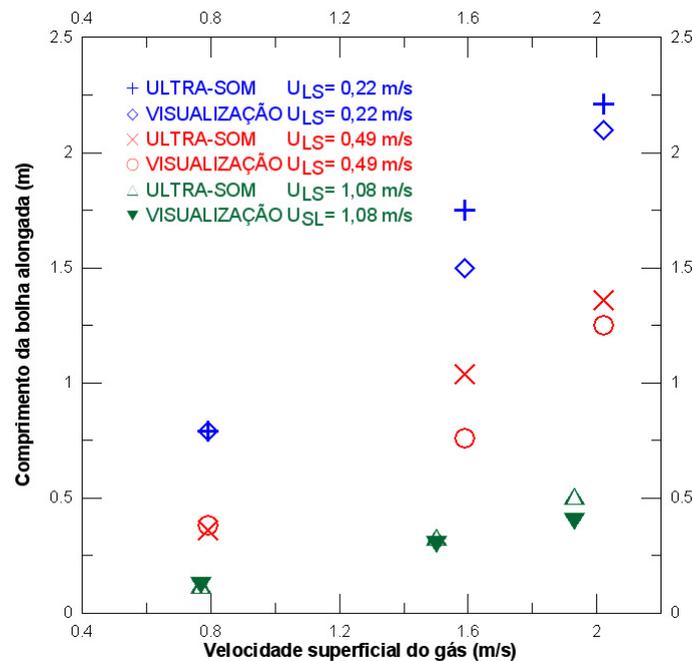


Figura 6.13: Comprimentos médios das bolhas alongadas medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $+5^\circ$.

A figura 6.14 apresenta a variação dos comprimentos médios dos pistões de líquido, medidos pelas técnicas ultra-sônica e por visualização, em função das velocidades superficiais de gás. Conforme também ocorreu no escoamento horizontal,

as variações dos comprimentos dos pistões de líquido não apresentaram coerência nem tendências definidas em relação a velocidade superficial do gás, indicando insensibilidade a variação da vazão de gás e a possibilidade que a faixa de velocidades estudadas seja uma região de transição. Observa-se uma fraca tendência de redução do comprimento do pistão de líquido a proporção que a velocidade superficial do líquido aumenta.

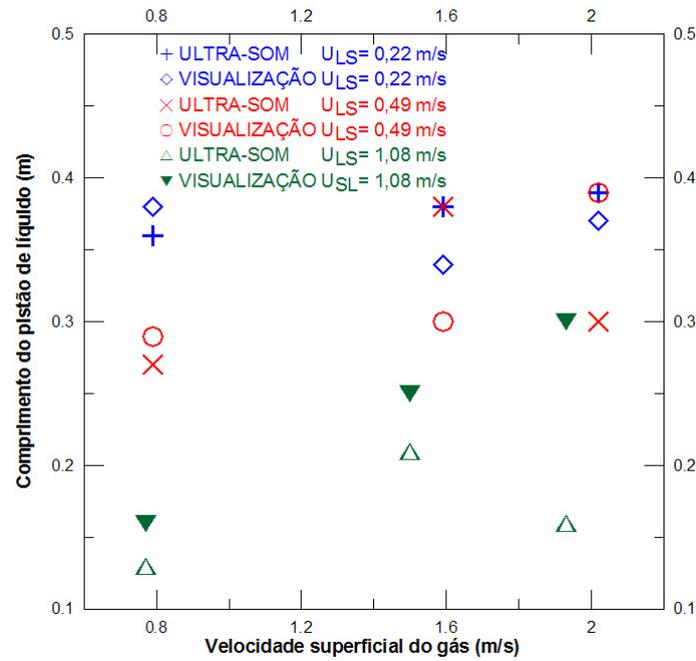


Figura 6.14: Comprimentos médios dos pistões de líquido medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás.

6.3 Escoamento Inclinado, $\beta=10^\circ$

Serão apresentados os resultados obtidos aplicando as técnicas ultra-sônica e por visualização através de tabelas e gráficos, de maneira semelhante ao apresentado para o escoamento horizontal, com aproximadamente o mesmo número de amostras.

A figura 6.15 apresenta um gráfico em termos de velocidades superficiais do ar e da água, obtidos na seção de testes com ângulo de inclinação de 10° , onde são indicados em azul os nove pontos estudados. Também, através da técnica de visualização, foram analisados outros pontos onde observou-se os tipos de padrões de escoamento desenvolvidos que foram representados neste mapa através dos símbolos *B* (bolhas) (dispersas), *S* (slug), *P* (pistonado) e *T* (transição).

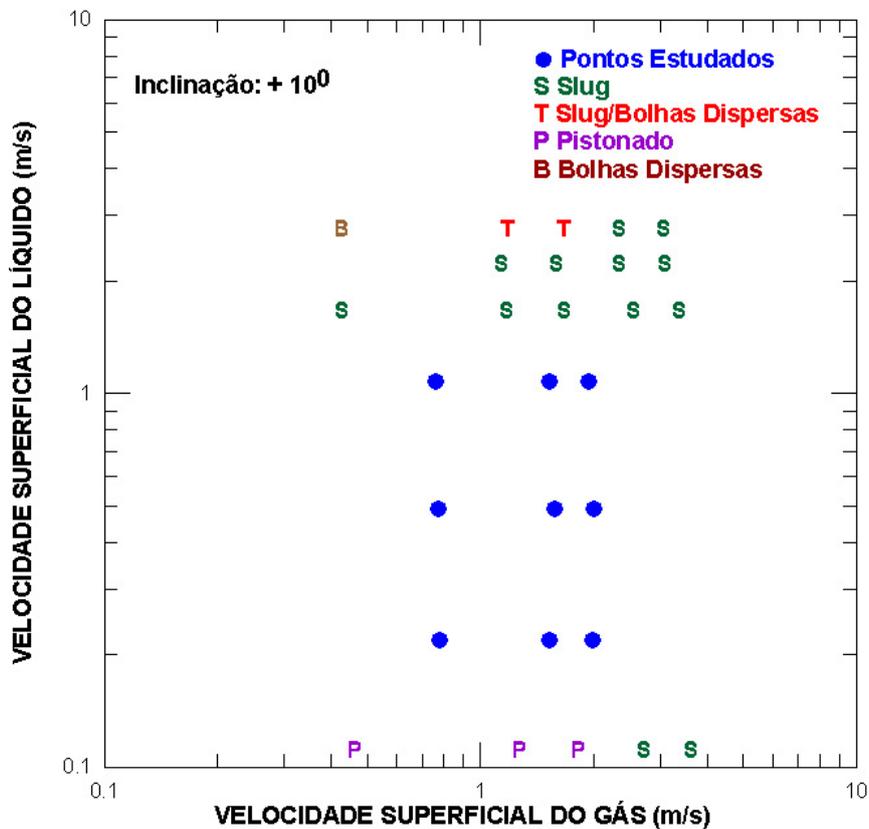


Figura 6.15: Pontos estudados e padrões de escoamento observados pela técnica por visualização.

6.3.1 Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média.

Os valores médios das velocidades da bolha alongada com os respectivo desvios padrões, estão indicados nas tabelas 14 e 15 do apêndice IV.

Seguindo o comportamento observado no escoamento horizontal e no ascendente inclinado de 5° , os desvios padrões das velocidades das caudas, utilizando as duas técnicas, apresentaram maiores desvios padrões.

Os coeficientes de variação referente aos valores medidos da velocidade do nariz da bolha, utilizando a técnica ultra-sônica, apresentaram as seguintes variações percentuais médias:

- 7,4% a 20,7% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 8,7% a 28,6% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 6,5% a 24,4% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Enquanto que para a técnica de visualização as variações percentuais médias foram:

- 4,4% a 6,1% para a velocidade superficial do líquido de 0,22 m/s,
- 3,5% a 5,7% para a velocidade superficial do líquido de 0,49 m/s e
- 1,0% a 3,2% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s.

Acompanhando a mesma tendência dos escoamentos anteriormente estudados, a técnica de visualização apresentou baixos coeficientes de variação, enquanto a técnica ultra-sônica médios coeficientes de variação, confirmando que para as atuais condições de estudo que as duas técnicas podem ser aplicadas.

As tabelas 6.9 e 6.10 apresentam a comparação entre os valores medidos das velocidades do nariz da bolha alongada V_{NB} e das velocidades médias das bolhas alongadas V_{MB} obtidas pela técnica ultra-sônica e pela técnica de visualização, utilizando a diferença relativa.

Os valores das velocidades medidos pela técnica ultra-sônica e por visualização, nestes testes, apresentaram valores próximos, diferença relativa máxima de 12,4%

Tabela 6.9: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para velocidade do nariz da bolha alongada, V_{NB} - Escoamento $+10^\circ$.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,78 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,52 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,98 \text{ m/s}$
12,3%	5,7%	1,2%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,57 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,00 \text{ m/s}$
8,7%	8,1%	1,5%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,76 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,52 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,94 \text{ m/s}$
9,0%	12,4%	9,5%

Tabela 6.10: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias das médias das velocidades do nariz e da cauda, V_{MB} - Escoamento $+10^\circ$.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,78 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,52 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,98 \text{ m/s}$
8,4%	0,7%	5,8%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,57 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,00 \text{ m/s}$
11,5%	1,9%	3,2%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,76 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,52 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,94 \text{ m/s}$
7,4%	8,7%	15,6%

para a velocidade do nariz da bolha e máximo e de 15,6% para a velocidade média da bolha. Em relação ao escoamento horizontal e ascendente de 5°, as diferenças relativas máximas aumentaram um pouco, porém, na média, as diferenças em relação ao escoamento ascendente de 5°, praticamente não apresentaram alteração. Portanto continua sendo observada uma boa concordância entre as técnicas.

Através das figuras 6.16 e 6.17 são analisados os comportamentos das velocidades do nariz da bolha e da velocidade média da bolha. Nestas figuras são apresentados os valores das velocidades medidos pelas duas técnicas. Para as duas figuras observa-se que mantida a velocidade superficial do líquido constante, as velocidades do nariz e da média da bolha alongada aumentam com o aumento da velocidade superficial da fase gás, indicando também uma tendência de relação linear entre elas.

A figura 6.18 relaciona os valores medidos das velocidades do nariz da bolha alongada com a velocidade da sua cauda obtidas pela técnica ultra-sônica. Observa-se que também nesta inclinação o escoamento não se encontrava plenamente desenvolvido, porém próximo.

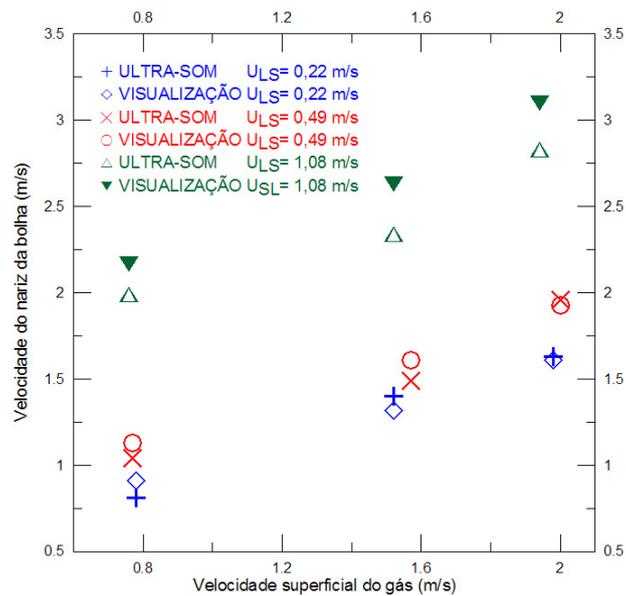


Figura 6.16: Velocidades do nariz da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - $\beta = +10^\circ$.

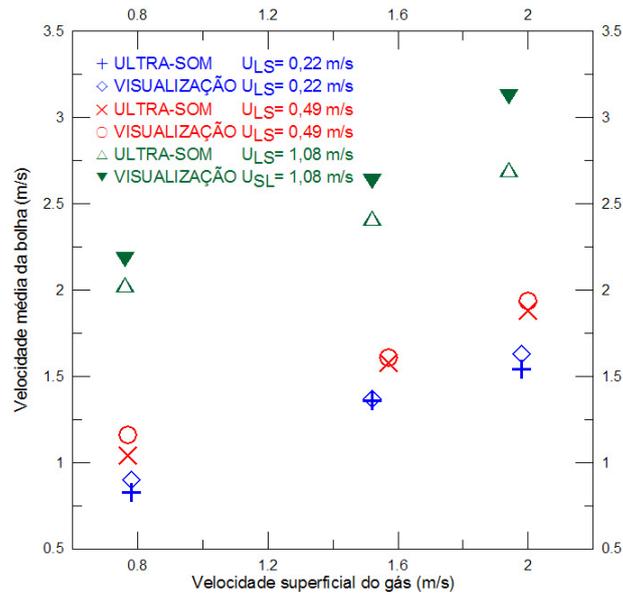


Figura 6.17: Velocidades médias da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - $\beta = +10^\circ$.

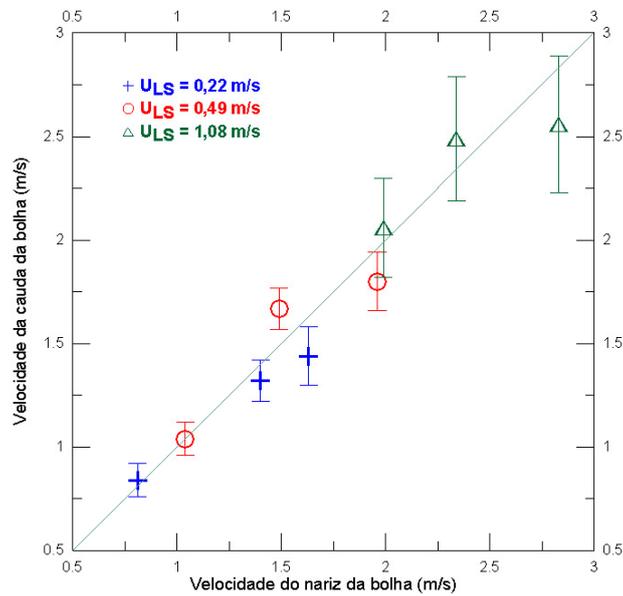


Figura 6.18: Velocidades médias da cauda da bolha alongada obtidas pelas técnicas ultra-sônica em função das velocidades do nariz da bolha alongada - $\beta = +10^\circ$.

6.3.2 Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Frontal, Posterior e Média.

Os valores médios das velocidades dos componetes dos pistões de líquido estão nas tabelas 16 e 17 do apêndice IV.

Comparando as duas as velocidades médias do pistão de líquido V_{MPL} , medidas pelas duas técnicas, através da diferença relativa, tabela 6.11, verifica-se que para as mais altas velocidades superficiais de líquido ocorreram as maiores diferenças, apresentando uma diferença maior do que as velocidades medidas no escoamento horizontal, porém menor que no escoamento ascendente de 5° .

Tabela 6.11: Diferença relativa entre as técnicas ultra-sônica e de visualização para as velocidades médias dos pistões de líquido (V_{MPL})- Escoamento $+10^\circ$.

$U_{LS} = 0,22 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,78 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,52 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,98 \text{ m/s}$
11,1%	5,4%	4,5%
$U_{LS} = 0,49 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,57 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 2,00 \text{ m/s}$
19,2%	3,9%	12,7%
$U_{LS} = 1,08 \text{ m/s}$		
$U_{GS} = 0,76 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,52 \text{ m/s}$	$U_{GS} = 1,94 \text{ m/s}$
8,5%	9,6%	16,0%

6.3.3 Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.

Os valores médios dos comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido estão nas tabelas 18 e 19 do apêndice IV.

A figura 6.19 apresenta a variação dos comprimentos médios das bolhas alongadas obtidas pelas técnicas ultra-sônica e de visualização, observa-se que para as maiores velocidade superficiais de líquido os resultados apresentaram melhor concor-

dância. Conforme ocorreu no escoamento horizontal, os comprimentos aumentam à medida que a velocidade superficial do gás aumenta, indicando também uma tendência de correlação linear entre as variáveis. Os coeficientes de correlação linear para o comprimento da bolha alongada utilizando a técnica ultra-sônica foram:

- 0,98 para a velocidade superficial de líquido de 0,22 m/s,
- 1,00 para a velocidade superficial de líquido de 0,49 m/s e
- 0,99 para a velocidade superficial de líquido de 1,08 m/s.

Estes valores foram próximos dos obtidos no escoamento horizontal e no ascendente de 5°.

Também observa-se que, para mesmas velocidades superficiais de gás, os comprimentos das bolhas alongadas diminuem à medida que a velocidade superficial do líquido aumenta. Comportamento semelhante também ocorreu no escoamento horizontal e no ascendente de 5°.

O gráfico 6.20 apresenta a variação dos comprimentos médios dos pistões de líquido, medidos pelas técnicas ultra-sônica e por visualização, em função das velocidades superficiais de gás. Conforme também ocorreu no escoamento horizontal e ascendente de 5°, não se observou relação entre os comprimentos dos pistões de líquido e a velocidade superficial de líquido. Para os pontos com velocidades superficiais de gás próximo, observa-se um comportamento de redução do comprimento do pistão de líquido à medida que a velocidade superficial do líquido aumenta.

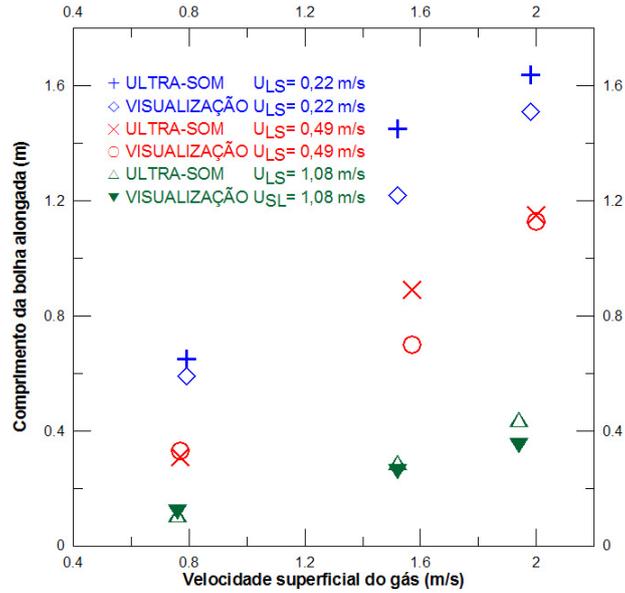


Figura 6.19: Comprimentos médios das bolhas alongadas medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $+10^\circ$.

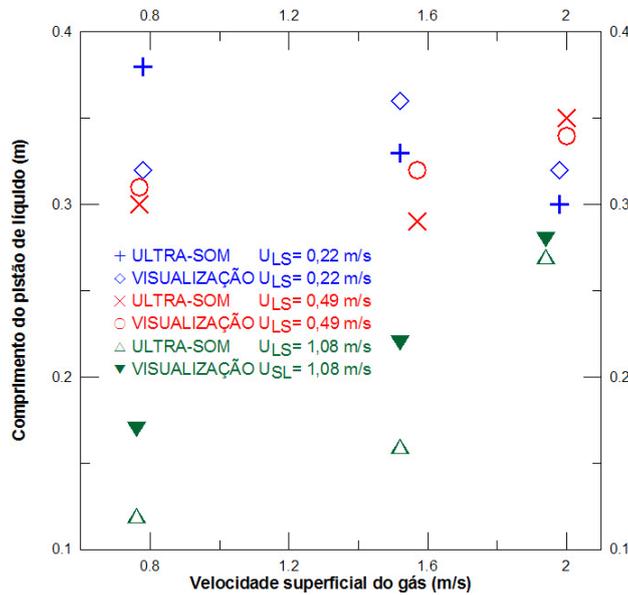


Figura 6.20: Comprimentos médios dos pistões de líquido medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $+10^\circ$.

6.4 Escoamento Inclinado, $\beta = -2,5^\circ$

Serão apresentados os resultados obtidos aplicando as técnicas ultra-sônica através de tabelas e gráficos, de maneira semelhante ao apresentado para o escoamento horizontal, com aproximadamente o mesmo número de amostras.

Como nos testes anteriores os parâmetros medidos utilizando a técnica ultra-sônica apresentaram boa concordância com os resultados da técnica por visualização e devido ao tempo exíguo para tratamento dos sinais, não serão apresentados os resultados obtidos pela técnica por visualização.

A figura 6.21 apresenta um gráfico em termos de velocidades superficiais do ar e da água, obtidos na seção de testes inclinada a $-2,5^\circ$, onde são indicados em azul os nove pontos estudados. Também, através da técnica de visualização, foram analisados outros pontos onde se observou os tipos de padrões de escoamento desenvolvidos que foram representados neste mapa através dos símbolos *E* (estratificado), *S* (slug), *P* (pistonado), *T* (transição) e *I* (intermitente). Neste teste observou-se que a região do escoamento estratificado aumentou. Também verificou-se a ocorrência de um tipo de padrão de escoamento que foi representado na figura 6.21 como *intermitente*, nele ocorria o padrão de escoamento slug com grande instabilidade nas interfaces. No mapa proposto por Oliemans e Pots (2006) há uma indicação deste tipo de padrão de escoamento que foi denominado por intermitente - anular.

6.4.1 Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média.

Os valores médios das velocidades da bolha alongada com os respectivo desvios padrões, estão indicados na tabela 20 do apêndice IV.

Através das figuras 6.22 e 6.23 são analisados os comportamentos das velocidades do nariz da bolha e da velocidade média da bolha. As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados representam a incerteza de medição. Os coeficientes de variação, que indicam as variações dos desvios padrões, apresentaram as seguintes variações percentuais médias:

- 12,7% a 32,0% para a velocidade do nariz da bolha e

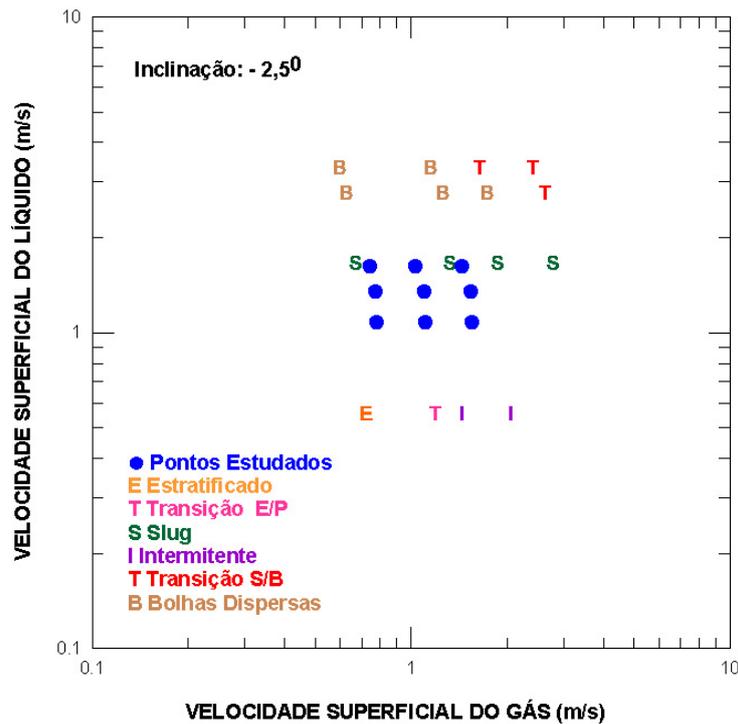


Figura 6.21: Pontos estudados e padrões de escoamento observados pela técnica por visualização.

- 9,7% a 24,9% para a velocidade média da bolha.

Portanto os coeficientes de variação indicam que os valores medidos apresentam de baixa a média dispersão.

Analisando as velocidades das bolhas alongadas, observa-se das figuras 6.22 e 6.23 que mantida a velocidade superficial do líquido constante, as velocidades do nariz e a velocidade média da bolha alongada aumentam com o aumento da velocidade superficial da fase gás, indicando uma tendência de relação linear entre elas. Os pontos dos gráficos, para uma mesma velocidade superficial de líquido, apresentaram uma relação linear com coeficiente de correlação superior a 0,98 para a velocidade do nariz da bolha e superior a 0,97 para a velocidade média da bolha, indicando forte dependência linear entre as variáveis. Conforme observado nos escoamentos horizontal e ascendentes, ocorre à mesma tendência de aumento das velocidades estudadas à medida que a velocidade superficial da fase gás aumenta.

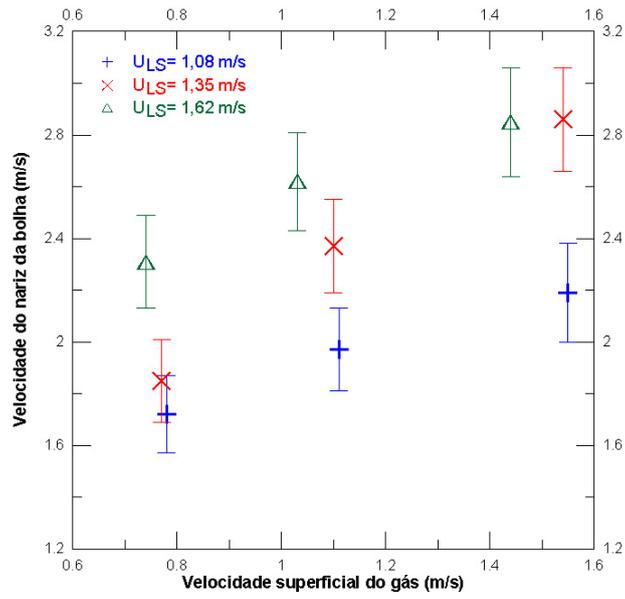


Figura 6.22: Velocidades médias do nariz da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$.

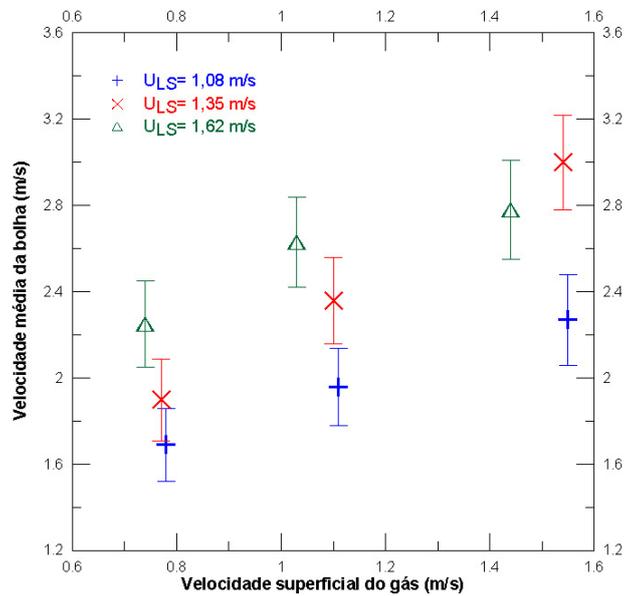


Figura 6.23: Velocidades médias da média da velocidade da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$.

O gráfico da figura 6.24 apresenta a relação entre as velocidades médias do nariz e da cauda da bolha alongada utilizando a técnica ultra-sônica. As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados representam a incerteza de medição. Observa-se que nestes testes alguns pontos se afastaram mais da linha diagonal, indicando um escoamento mais afastado do plenamente desenvolvido.

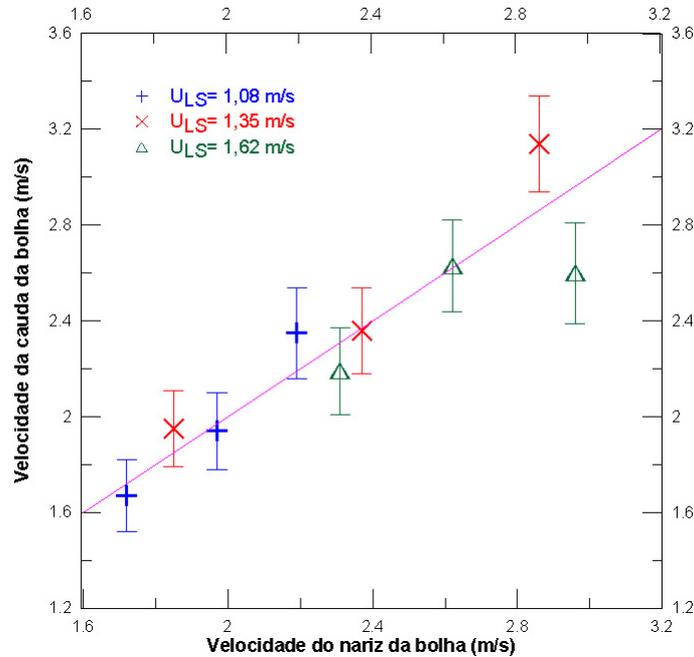


Figura 6.24: Velocidades médias do nariz e da cauda da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$.

Os valores médios do nariz da bolha alongada foram comparados com a correlação proposta por Bendixsen et al-1984. O gráfico da figura 6.25 apresenta essa comparação.

Para a maior velocidade superficial de líquido os valores medidos pela técnica ultra-sônica e os calculados pela correlação de Bendixsen (1984) apresentaram valores mais próximos, ocorrendo aumento da diferença conforme a velocidade superficial do líquido foi aumentando. Conforme ocorreu no escoamento horizontal, as menores diferenças ocorreram para as maiores velocidades superficiais de líquido. Também se observa que há uma tendência da diferença aumentar à medida que a velocidade do gás aumenta. Em todos os pontos estudados as velocidades do nariz da bolha obtidas pela correlação de Bendixsen (1984) foram maiores do que as obtidas pela

técnica ultra-sônica.

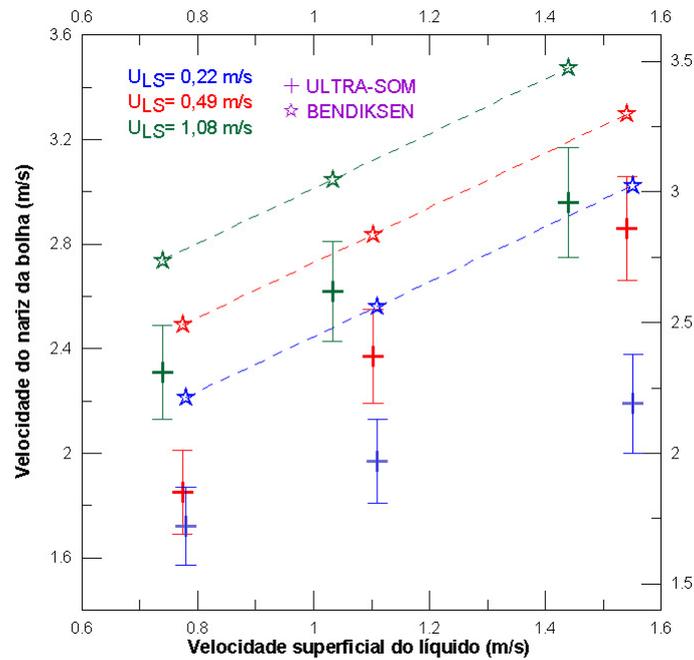


Figura 6.25: Velocidades médias do nariz da bolha alongada medidas pela técnicas ultra-sônica e obtidas pela correlação de Bendiksen (1984) em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $-2, 5^\circ$.

6.4.2 Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Frontal, Posterior e Média.

Os valores médios das velocidades dos componetes dos pistões de líquido estão na tabela 21 do apêndice IV.

6.4.3 Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.

Os valores médios dos comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido estão na tabela 22 do apêndice IV.

A figura 6.26 apresenta os comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultra-sônica. As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados

representam a incerteza de medição. Os desvios padrões apresentaram os seguintes coeficientes de variação:

- 33,3% a 51,4% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s,
- 26,7% a 69,0% para a velocidade superficial do líquido de 1,35 m/s e
- 23,5% a 29,4% para a velocidade superficial do líquido de 1,62 m/s.

A ocorrência em alguns pontos estudados de altos coeficientes de variação está relacionado com a alta dispersão dos comprimentos das bolhas alongadas, na literatura são apresentados resultados com grande dispersão nos comprimentos da bolha alongada (Roitberg et al., 2008).

Da observação visual do escoamento, verificou-se uma redução da região do padrão intermitente, também observou-se que apresenta uma região mais aerada do que nos escoamentos horizontal e ascendente. Essas características dificultam o tratamento de sinais e pode causar como consequência influência no valor do coeficiente de variação.

Analisando a figura 6.26 verifica-se que, mantida constante a velocidade superficial do líquido, na primeira variação da velocidade superficial do gás, aproximadamente de 0,77 m/s para 1,10 m/s, o comprimento da bolha alongada pouco varia, na segunda variação da velocidade superficial do gás, aproximadamente de 1,10 m/s para 1,54 m/s, os comprimentos das bolhas alongadas aumentam de tamanho, em torno de 68% para as duas menores velocidades superficiais de líquido e de 21,4% para a maior velocidade. Diferentemente do que ocorreu nos escoamentos horizontal e ascendentes, somente em um caso há uma forte tendência de correlação linear entre as variáveis ($U_{SL} = 1,08$). Esse comportamento deve estar associado a forte aerção do escoamento observado pela técnica de visualização.

Também se observa uma redução do comprimento da bolha alongada à medida que a velocidade superficial do líquido diminui, a redução é mais acentuada para as maiores velocidades superficiais de gás.

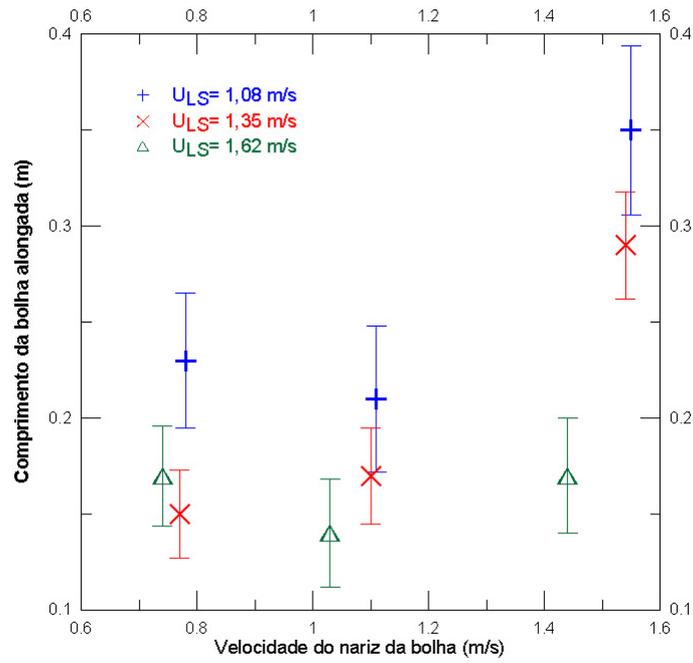


Figura 6.26: Comprimentos médios das bolhas alongadas medido pela técnica ultra-sônica em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $-2, 5^\circ$.

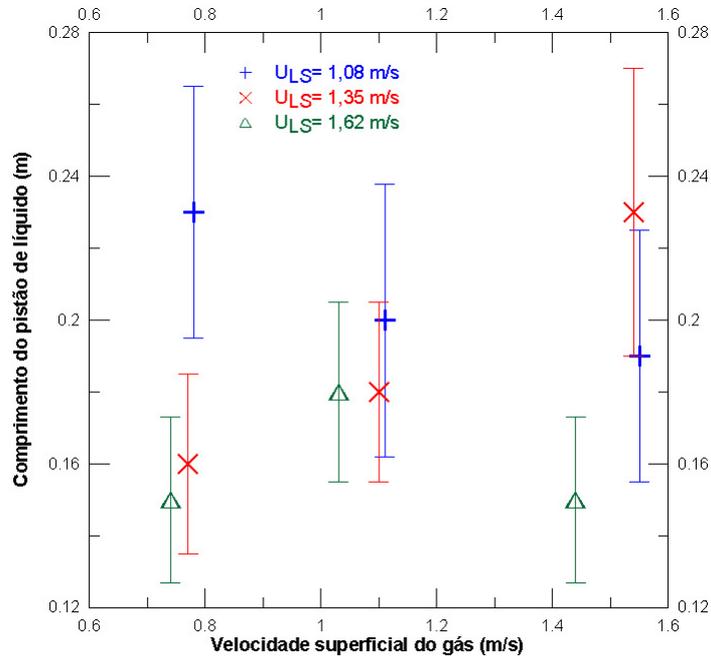


Figura 6.27: Comprimentos médios dos pistões de líquido medido pela técnica ultra-sônica em função da velocidade superficial do gás - Escoamento $-2, 5^\circ$.

A figura 6.27 apresenta os valores obtidos dos comprimentos médios dos pistões de líquido medidos pela técnica ultra-sônica. Conforme ocorreu nos escoamentos horizontal e ascendente estudados não se verifica uma correspondência entre os comprimentos dos pistões de líquido e a variação da vazão do gás. Para velocidades superficiais de gás próximas, observa-se uma fraca tendência de redução do comprimento do pistão de líquido a medida que a velocidade superficial do líquido aumenta.

6.5 Escoamento Inclinado, $\beta = -5^\circ$

Serão apresentados os resultados obtidos aplicando as técnicas ultra-sônica através de tabelas e gráficos, de maneira semelhante ao apresentado para o escoamento horizontal, com aproximadamente o mesmo número de amostras.

Como nos testes anteriores os parâmetros medidos utilizando a técnica ultra-sônica apresentaram boa concordância com os resultados da técnica por visualização e devido ao tempo exíguo para tratamento dos sinais, não serão apresentados os resultados obtidos pela técnica por visualização.

A figura 6.28 apresenta um gráfico em termos de velocidades superficiais do ar e da água, obtidos na seção de testes inclinada a -5° , onde são indicados em azul os nove pontos estudados. Também, através da técnica de visualização, foram analisados outros pontos onde se observou os tipos de padrões de escoamento desenvolvidos que foram representados no mapa através dos símbolos *E* (estratificado), *S* (slug), e *I* (intermitente). Neste teste observou-se um aumento da região do padrão de escoamento estratificado em relação ao escoamento de ângulo de inclinação $-2,5^\circ$. Conforme foi verificado no escoamento descendente de $-2,5^\circ$, também verificou-se a ocorrência de um tipo de padrão de escoamento que foi representado na figura 6.28 como *intermitente*, nele ocorria o padrão de escoamento slug com grande instabilidade nas interfaces. No mapa proposto por Petalas e Aziz (1998) há uma indicação deste tipo de padrão de escoamento que foi denominado por *transição*. Também verificou-se a ocorrência de um tipo de padrão de escoamento que foi representado na figura 6.21 como *intermitente*, nele ocorria o padrão de escoamento slug com

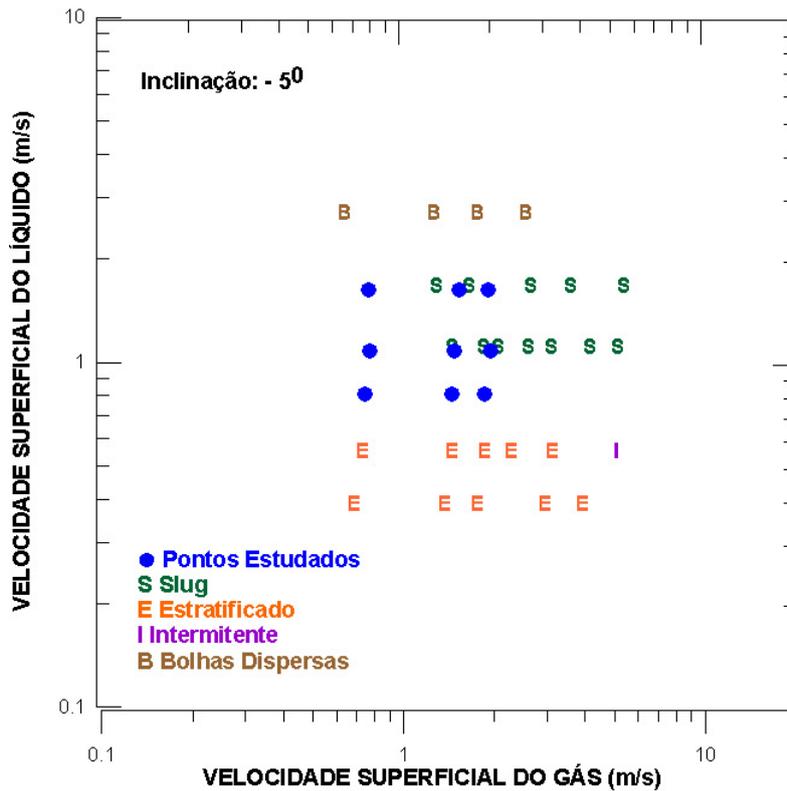


Figura 6.28: Pontos estudados e padrões de escoamento observados pela técnica por visualização - Escoamento -5° .

grande instabilidade nas interfaces. No mapa proposto por Petalas e Aziz (1998) há uma indicação deste tipo de padrão de escoamento que foi denominado por transição.

6.5.1 Velocidades Médias das Bolhas Alongadas - Velocidades do Nariz, Cauda e Média.

Os valores médios das velocidades da bolha alongada com os respectivo desvios padrões, estão indicados na tabela 23 do apêndice IV.

Através das figuras 6.29 e 6.30 são analisados os comportamentos das velocidades do nariz da bolha e da velocidade média da bolha. As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados representam a incerteza de medição. Os coeficientes de variação apresentaram as seguintes variações percentuais médias:

- 20,6% a 50,8% para a velocidade superficial do líquido de 0,81 m/s,

- 43,8% a 69,7% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s e
- 17,6% a 58,1% para a velocidade superficial do líquido de 1,62 m/s.

Portanto os coeficientes de variação indicam que os valores medidos apresentam de baixa a média dispersão.

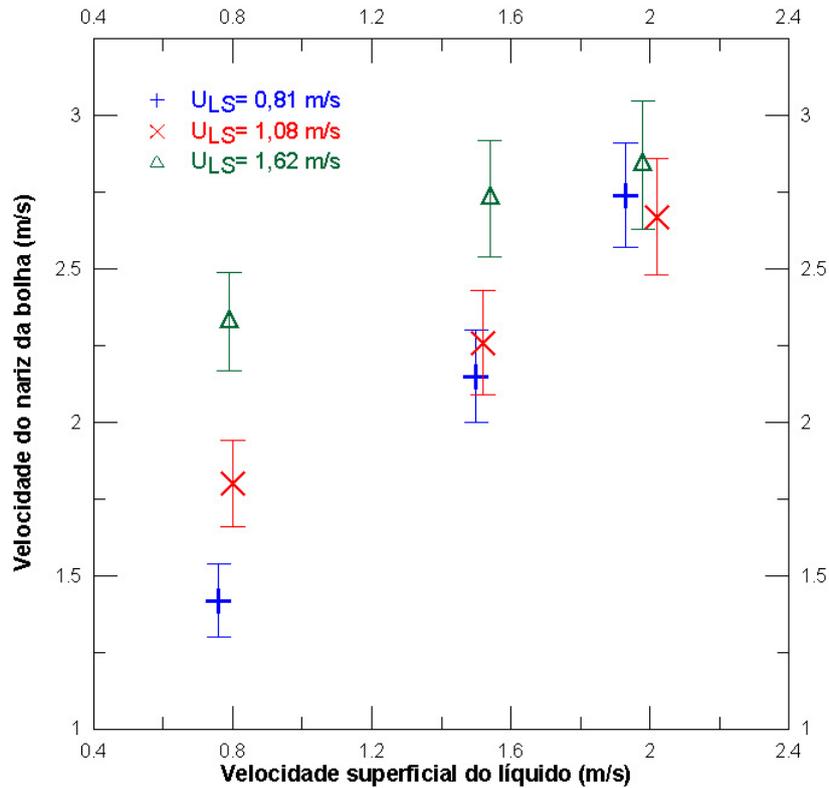


Figura 6.29: Velocidades médias do nariz da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5° .

Os pontos dos gráficos, para uma mesma velocidade superficial de líquido, apresentaram relações lineares com coeficientes de correlação superior a 97% para a velocidade do nariz da bolha e superior a 95% para a velocidade média da bolha. Conforme observado nos escoamentos horizontal e ascendente, ocorre à mesma tendência de aumento das velocidades do nariz e da velocidade média da bolha alongada à medida que a velocidade superficial da fase gás aumenta.

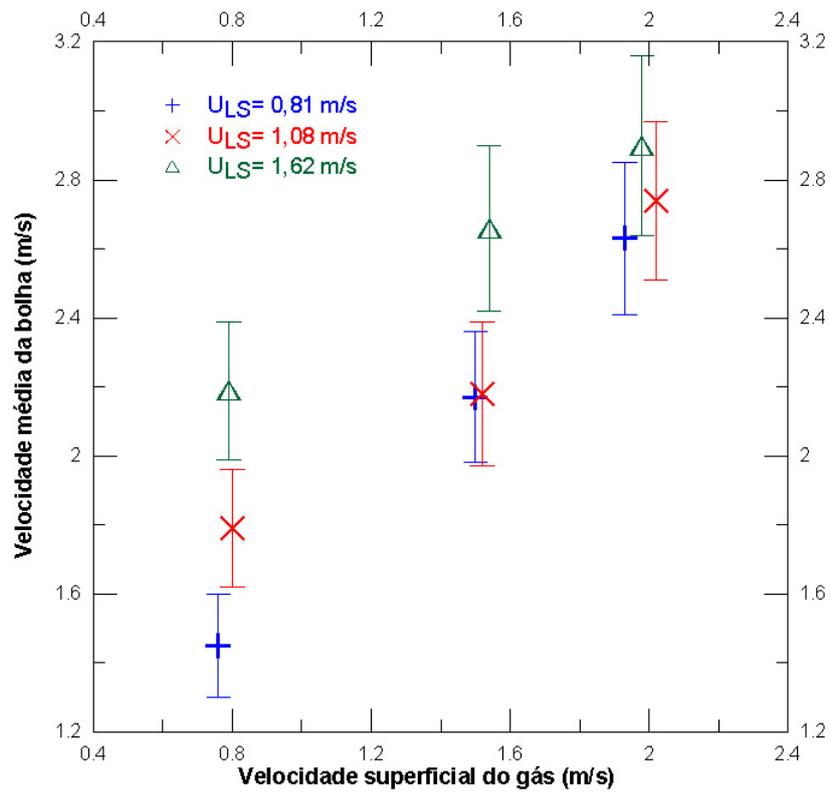


Figura 6.30: Velocidades médias da média da velocidade da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5° .

O gráfico da figura 6.31 apresenta a relação entre as velocidades médias do nariz e da cauda da bolha alongada utilizando a técnica ultra-sônica. Observa-se que nestes testes alguns pontos se afastaram mais da linha diagonal, indicando um escoamento mais afastado do plenamente desenvolvido.

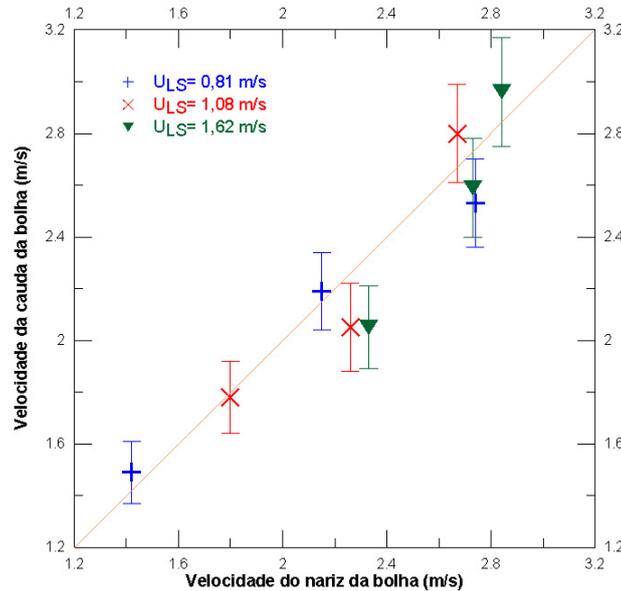


Figura 6.31: Velocidades médias da cauda da bolha alongada obtida pela técnica ultra-sônica em função das velocidades do nariz da bolha alongada - $\beta = -5^\circ$.

Os valores médios do nariz da bolha alongada foram comparados com a correlação proposta por Bendiksen (1984). O gráfico da figura 6.32 apresenta essa comparação. Para a menor velocidade superficial de líquido, os valores medidos pela técnica ultra-sônica e os calculados pela correlação de Bendiksen (1984) apresentaram valores mais próximos, ocorrendo aumento da diferença conforme a velocidade superficial do líquido foi aumentando. Ao contrário do que ocorreu no escoamento horizontal, onde as maiores diferenças ocorreram para as menores velocidades superficiais de líquido. Também se observa que há uma tendência da diferença aumentar à medida que a velocidade do gás aumenta. Em todos os pontos estudados as velocidades do nariz da bolha obtidas pela correlação de Bendiksen (1984) foram maiores do que as obtidas pela técnica ultra-sônica.

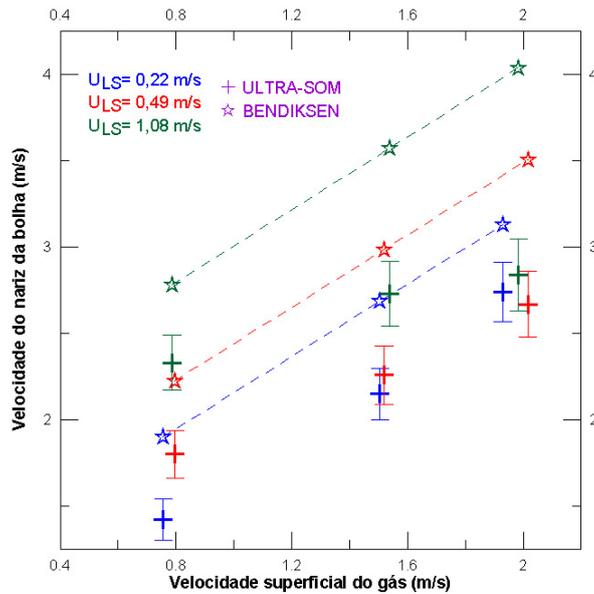


Figura 6.32: Velocidades médias do nariz da bolha alongada medidas pela técnicas ultra-sônica e obtidas pela correlação de Bendiksen et al-1984 em função da velocidade superficial do gás - $\beta = 5^\circ$.

6.5.2 Velocidades Médias do Pistão de Líquido - Velocidades Frontal, Posterior e Média.

Os valores médios das velocidades dos componentes dos pistões de líquido estão na tabela 24 do apêndice IV.

6.5.3 Comprimentos Médios das Bolhas Alongadas e dos Pistões de Líquido.

Os valores médios dos comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido estão na tabela 25 do apêndice IV.

A figura 6.33 apresenta os comprimentos médios das bolhas alongadas obtidos pela técnica ultra-sônica. As linhas verticais finas passando pelos pontos estudados representam a incerteza de medição. Os desvios padrões apresentaram os seguintes coeficientes de variação:

- 20,6% a 50,8% para a velocidade superficial do líquido de 0,81 m/s,

- 43,8% a 69,7% para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s e
- 17,6% a 58,1% para a velocidade superficial do líquido de 1,62 m/s.

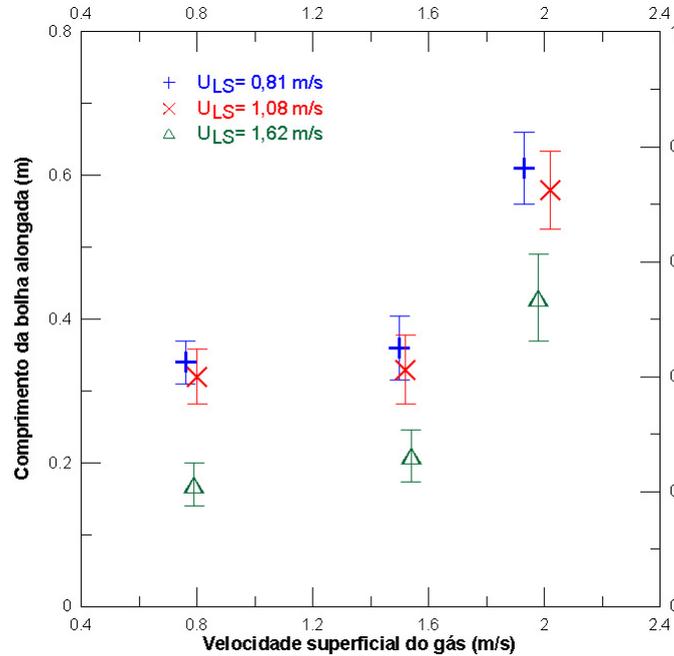


Figura 6.33: Comprimentos médios das bolhas alongadas medido pela técnica ultrassônica em função da velocidade superficial do gás - Escoamento -5° .

Embora alguns valores dos coeficientes sejam elevados, na literatura são apresentados resultados com grande dispersão nos comprimentos da bolha alongada (Roitberg et al., 2008).

Mantidas as velocidades superficiais de líquido constante, os comprimentos das bolhas alongadas aumentaram à medida que a velocidade superficial do gás aumentou e, ao contrário, para mesmas velocidades superficiais de gás, ou com valores bem próximos, o comprimento diminuiu à proporção que a velocidade superficial do líquido aumentou. O mesmo comportamento foi observado no escoamento horizontal, porém neste as variações no comprimento foram maiores.

Os coeficientes de correlação linear do comprimento da bolha alongada em relação a velocidade superficial do gás foram:

- 0,82 para a velocidade superficial do líquido de 0,81 m/s,

- 0,83 para a velocidade superficial do líquido de 1,08 m/s e
- 0,86 para a velocidade superficial do líquido de 1,62 m/s.

Os coeficientes de correlação apresentaram valores um pouco menor do que no escoamento horizontal, mas está acima de 0,8 indicando forte correlação linear.

Variando a velocidade superficial de gás de aproximadamente 0,79 m/s para 1,52 m/s ocorreu pequeno aumento no comprimento médio da bolha alongada, em torno de 5% para as menores velocidades superficiais de líquido e de 25% para a maior velocidade e ao variar a velocidade de aproximadamente 1,52 m/s para 1,98 m/s, ocorreu um significativo aumento do comprimento médio da bolha alongada, superior a 69%, por essa razão a variação do comprimento médio da bolha em função da velocidade superficial do gás apresentou baixa correlação linear, coeficiente de correlação linear em torno de 0,70, ao contrário do que ocorreu no escoamento horizontal cujos coeficientes de correlação foram 1,00, 0,84 e 0,96.

A figura do gráfico 6.34 apresenta os valores obtidos dos comprimentos médios dos pistões de líquido medidos pela técnica ultra-sônica. Nas etapas estudadas, onde foram mantidas constantes as três velocidades superficiais do líquido, os pistões de líquido apresentaram uma redução de comprimento na primeira variação da velocidade superficial de gás e um aumento nos seus comprimentos na segunda variação da velocidade. Diferentemente do que ocorreu nos escoamentos horizontal e ascendentes estudados, onde não ocorreu relação entre a variação dos comprimentos dos pistões de líquido com a vazão do gás, os resultados indicam uma possibilidade de ser uma região de transição no comportamento dos comprimentos dos pistões de líquido.

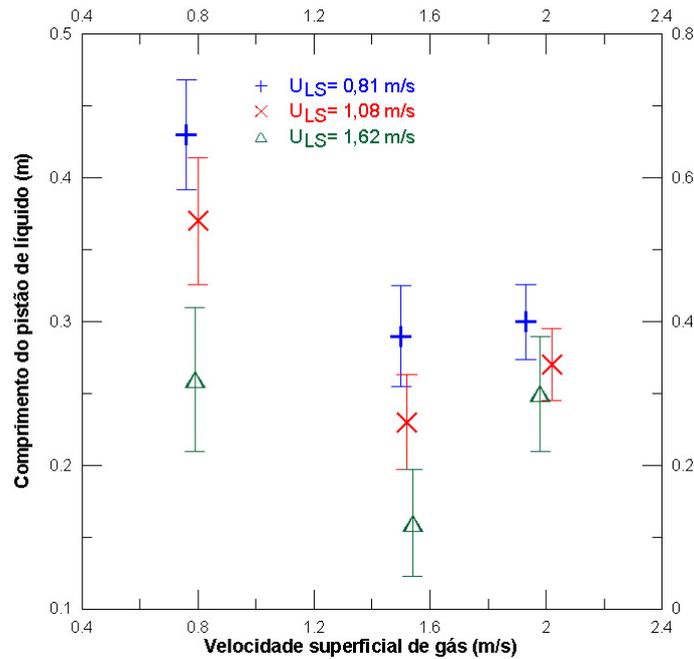


Figura 6.34: Comprimentos médios dos pistões de líquido medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização em função da velocidade superficial do gás - Escoamento -5° .

6.6 Variação das Velocidades do Nariz e Comprimentos da Bolha Alongada em Relação a Inclinação do Escoamento

6.6.1 Variação das Velocidades do Nariz Bolha Alongada

As figuras 6.35 e 6.36 apresentam a variação da velocidade do nariz da bolha em relação a velocidade superficial do gás utilizando respectivamente as técnicas ultra-sônica e visualização. Os experimentos foram realizados nos escoamentos horizontal e ascendentes de 5° e 10° .

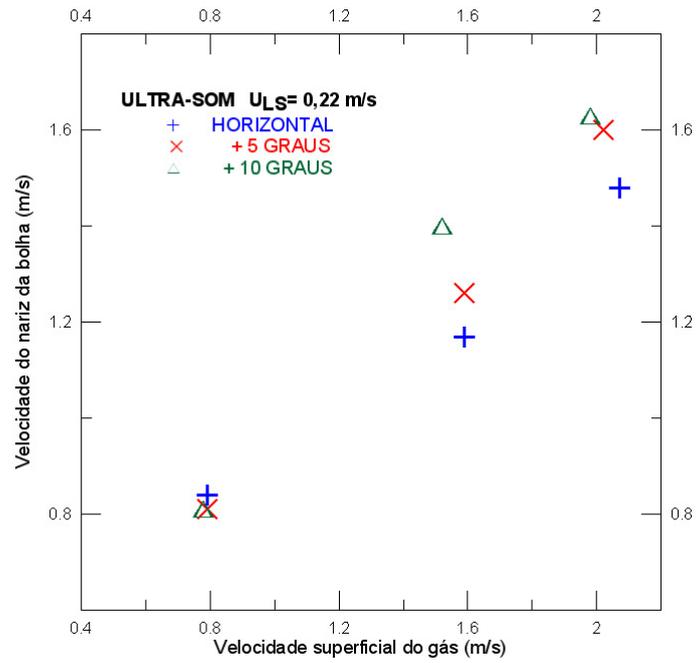


Figura 6.35: Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás obtidas pela técnica ultra-sônica.

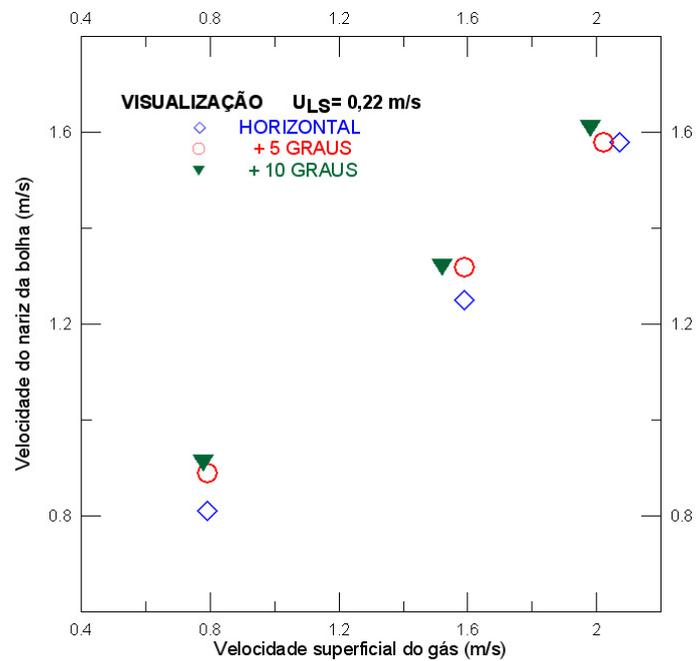


Figura 6.36: Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás obtidas pela técnica de visualização.

Na menor velocidade superficial de gás os valores das velocidades do nariz medidos pelas duas técnicas ficaram bem próximos, principalmente os da técnica ultra-sônica, indicando pouca influência do ângulo de inclinação na faixa estudada. À medida que as velocidades superficiais do gás aumentavam ocorria uma maior influência da variação do ângulo percebida pela técnica ultra-sônica.

As figuras 6.37 e 6.38 são semelhantes as anteriores, porém os testes foram realizados para a velocidade superficial de líquido constante de $0,49 \text{ m/s}$. Nas duas técnicas não se observa uma relação entre a velocidade do nariz da bolha com a velocidade superficial do gás ao variar o ângulo de escoamento.

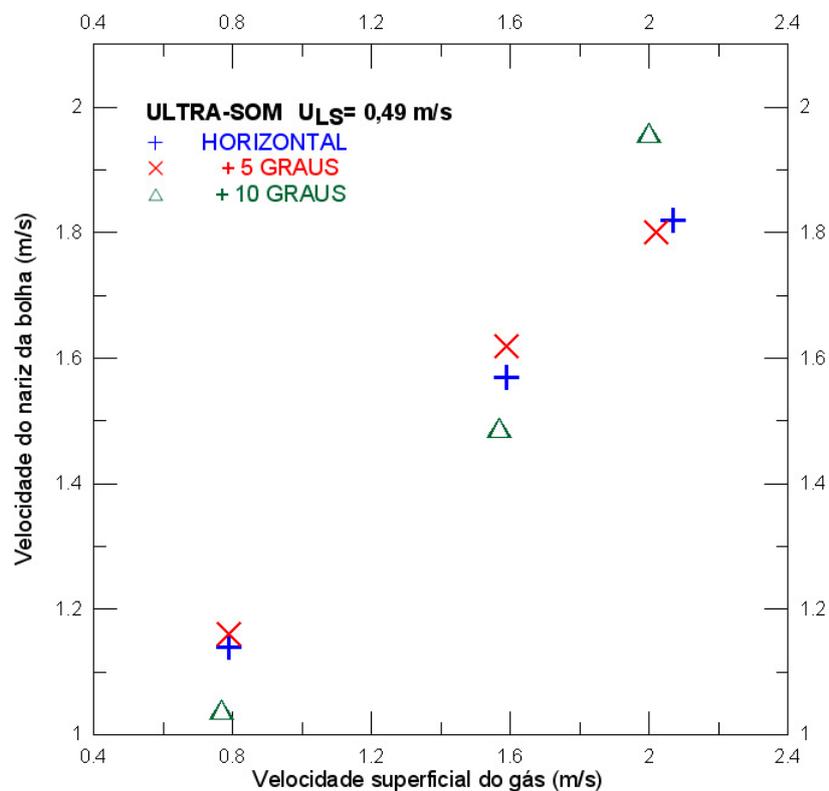


Figura 6.37: Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal e ascendente ($+5^\circ$ e $+10^\circ$) obtidas pela técnica de ultra-som.

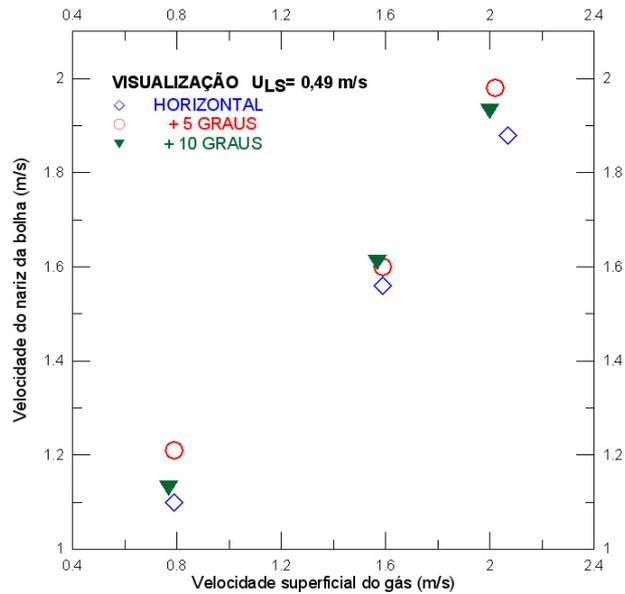


Figura 6.38: Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal e ascendente (+5° e +10°) obtidas pela técnica de visualização.

A figura 6.39 é semelhante as anteriores, porém são apresentados somente os resultados obtidos pela técnica ultra-sônica para os cinco ângulos de inclinação estudados. As velocidades do nariz da bolha para os escoamentos descendentes apresentaram menores valores do que os apresentados nos escoamentos horizontal e ascendentes, de acordo com correlação proposta por Bendiksen (1984).

A figura 6.40 mostra o comportamento da velocidade do nariz da bolha com a variação do ângulo de escoamento. Em razão da flutuação de pressão que ocorria no local de aquisição de dados há pequenas diferenças no valor da velocidade superficial do gás. Os valores referentes a inclinação de $-2, 5^\circ$ não foram colocados em razão de terem apresentado uma velocidade superficial de gas mais distante do que os outros. Verifica-se que há uma tendência da velocidade do nariz da bolha diminuir à medida que o escoamento passa de descendente (-5°) para ascendente (10°). Também se observa que ao variar o escoamento de horizontal para ascendente de 10° , o decréscimo da velocidade do nariz da bolha é mais acentuado para as maiores velocidades superficiais de gás.

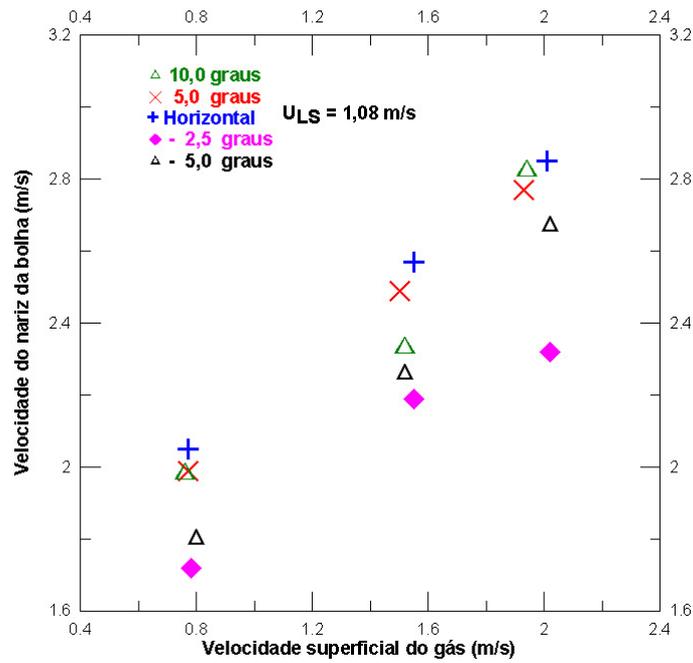


Figura 6.39: Velocidades do nariz da bolha em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal, ascendente ($+5^\circ$ e $+10^\circ$) e descendente ($-2,5^\circ$ e -5°) obtidas pela técnica ultra-sônica.

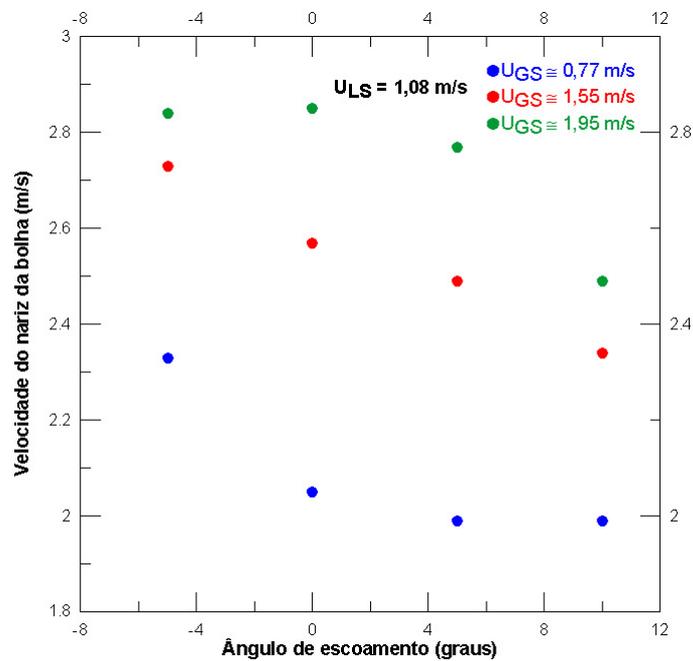


Figura 6.40: Velocidades do nariz da bolha em função do ângulo de inclinação, obtidas pela técnica ultra-sônica.

6.6.2 Variação do Comprimento da Bolha Alongada

A figura 6.41 apresenta os valores médios do comprimento da bolha alongada em função da velocidade superficial do gás, para uma velocidade superficial de líquido constante ($U_{LS}=1,08 \text{ m/s}$), utilizando a técnica ultra-sônica para os cinco ângulos de inclinação estudados. Em quase todos os pontos estudados, para uma mesma velocidade superficial do gás, se observa uma tendência do comprimento da bolha alongada diminuir ao variar o escoamento de horizontal para $+10^\circ$ e ao variar o escoamento de horizontal para -5° não se observa um comportamento definido.

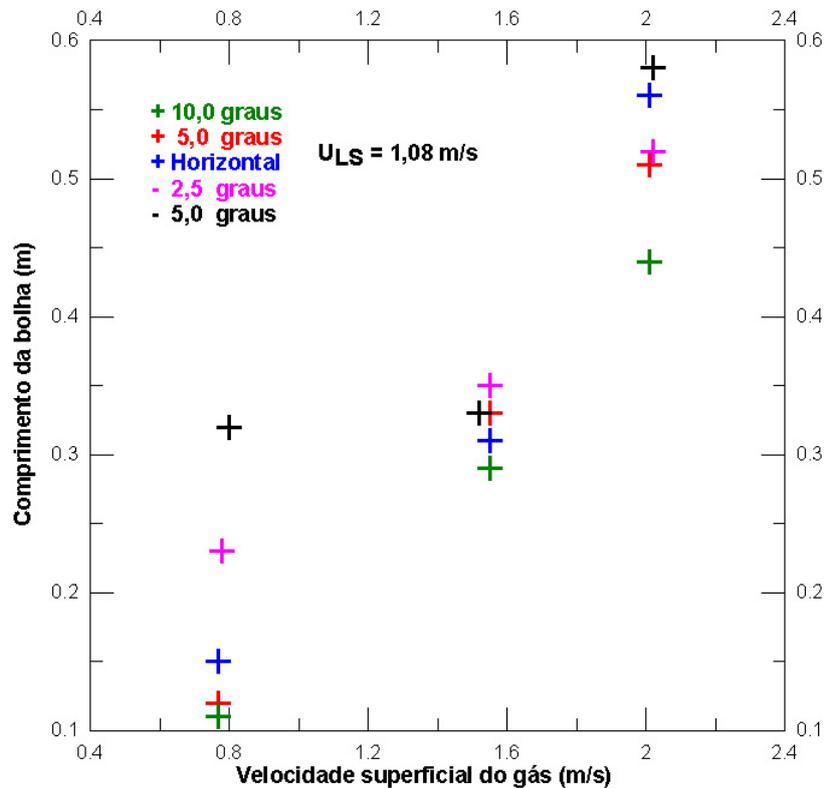


Figura 6.41: Comprimentos da bolha alongada em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal, ascendente ($+5^\circ$ e $+10^\circ$) e descendente ($-2,5^\circ$ e -5°) obtidas pela técnica ultra-sônica.

A figura 6.42 mostra o comprimento da bolha alongada com a variação do ângulo de escoamento. Os valores referentes a inclinação de $-2,5^\circ$ não foram colocados em razão de terem apresentado uma velocidade superficial de gas mais distante do que os outros.

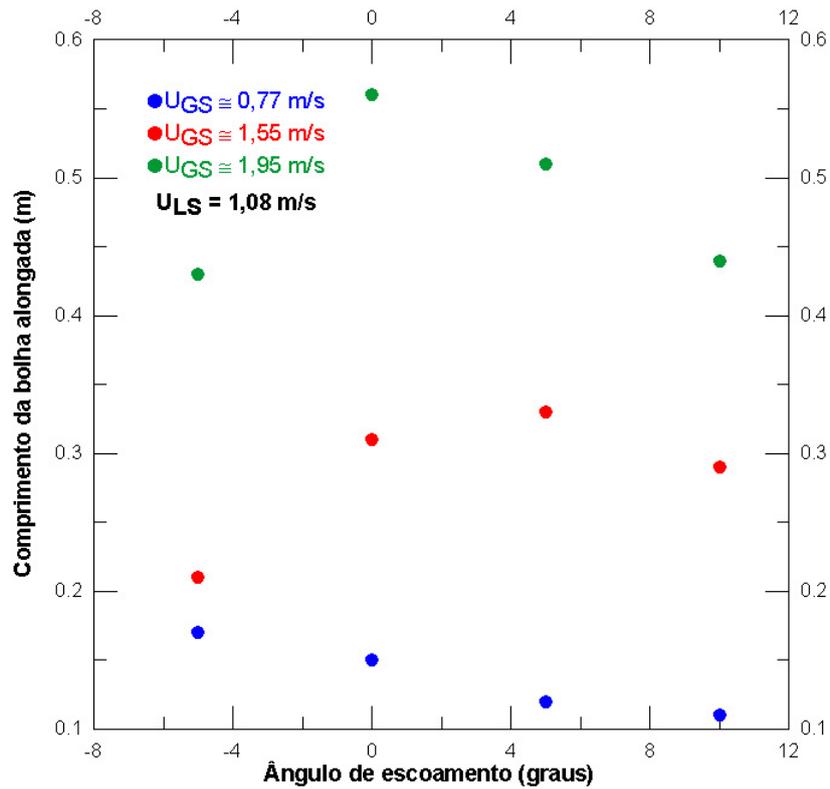


Figura 6.42: Comprimentos da bolha alongada em função das velocidades superficiais de gás para escoamentos horizontal, ascendente de $+5^\circ$ e $+10^\circ$ e descendente de -5° obtidas pela técnica ultra-sônica.

A bolha alongada apresentou redução de comprimento na menor velocidade superficial de gás estudada $U_{GS} = 0,77m/s$ ao variar o escoamento de descende para ascendente. Para as maiores velocidades, $U_{GS} = 1,55m/s$ e $U_{GS} = 1,95m/s$, ocorreu aumento ao variar de -5° a 0° , voltando a reduzir o comprimento ao variar de 0° a 10° .

6.7 Perfil da Bolha

Nesta seção são apresentados os perfis das caudas das bolhas obtidos pelas técnicas por visualização e ultra-sônica referente aos escoamentos horizontal e ascendentes com ângulo de inclinação de $+5^\circ$ e $+10^\circ$. Como não havia sincronismo no início da aquisição de dados entre as duas técnicas os perfis representam condições da interface ar-água em instantes diferentes.

A figura 6.43 apresenta os perfis da cauda da bolha alongada obtidos pelas técnicas por visualização e ultra-sônica durante o escoamento horizontal. Através das duas técnicas, pode ser visto que ocorrem mudanças no perfil da cauda conforme as velocidades superficiais do líquido e do gás são modificadas. Para uma mesma velocidade superficial de líquido, o desprendimento de pequenas bolhas ocorria à proporção que a velocidade superficial do gás aumentava. O mesmo ocorria quando se mantinha a velocidade superficial do gás constante e aumentava a velocidade superficial do líquido, porém o efeito de cisalhamento da água sobre a bolha alongada causava menor formação de pequenas bolhas dispersas no pistão de líquido.

O sistema ultra-sônico fornece uma curva que tende acompanhar a interface ao longo do tubo. À medida que a cauda começa a apresentar desprendimento de bolhas e redução de comprimento a forma da curva obtida pela técnica ultra-sônica passa de ondulada para uma reta.

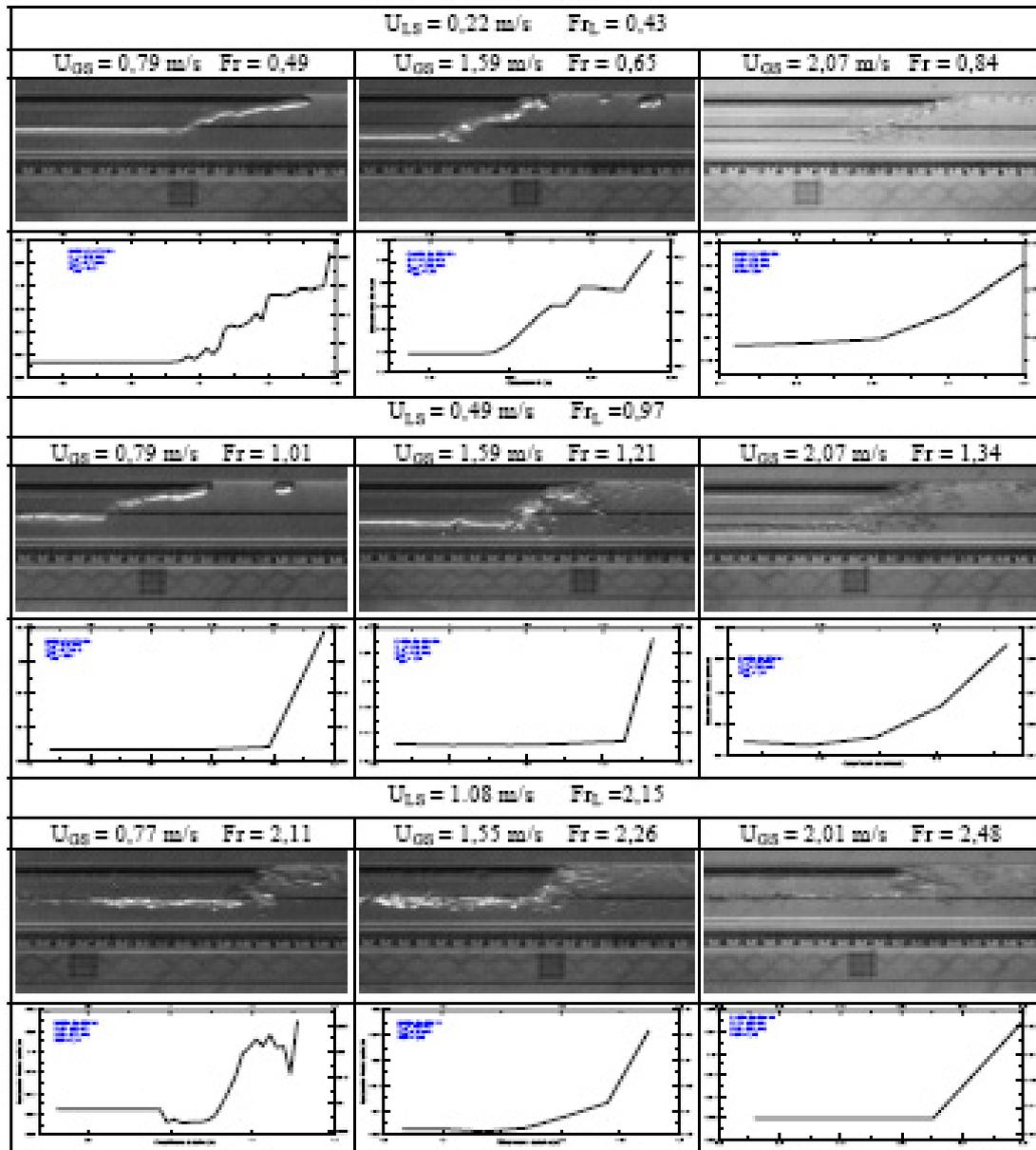


Figura 6.43: Imagens dos perfis das caudas das bolhas alongadas obtidas pela técnicas de visualização e ultra-sônica - Escoamento horizontal.

A figura 6.44 apresenta os perfis da cauda da bolha alongada obtidos pelas técnicas por visualização e ultra-sônica durante o escoamento ascendente de $+5^\circ$. O comportamento da variação das velocidades superficiais de gás e líquido foi semelhante ao escoamento horizontal, porém se observa que o desprendimento das bolhas da cauda ocorre logo na mais baixa velocidade superficial de líquido ($U_{LS} = 0,22m/s$), indicando que a fronteira entre os escoamentos pistonado e slug é deslocada para a esquerda.

Os perfis das caudas obtidos pela técnica ultra-sônica apresentaram maiores picos e ondulações à medida que a velocidade superficial líquido aumentou. Observa-se que, para mesmas velocidades superficiais de líquido, à medida que aumenta a velocidade superficial do gás ocorre o desprendimento de bolhas. Os perfis obtidos pelas técnica ultra-sônica apresentaram uma mudança da forma da curva de suave com picos para uma reta inclinada conforme o desprendimento de bolhas aumentava.

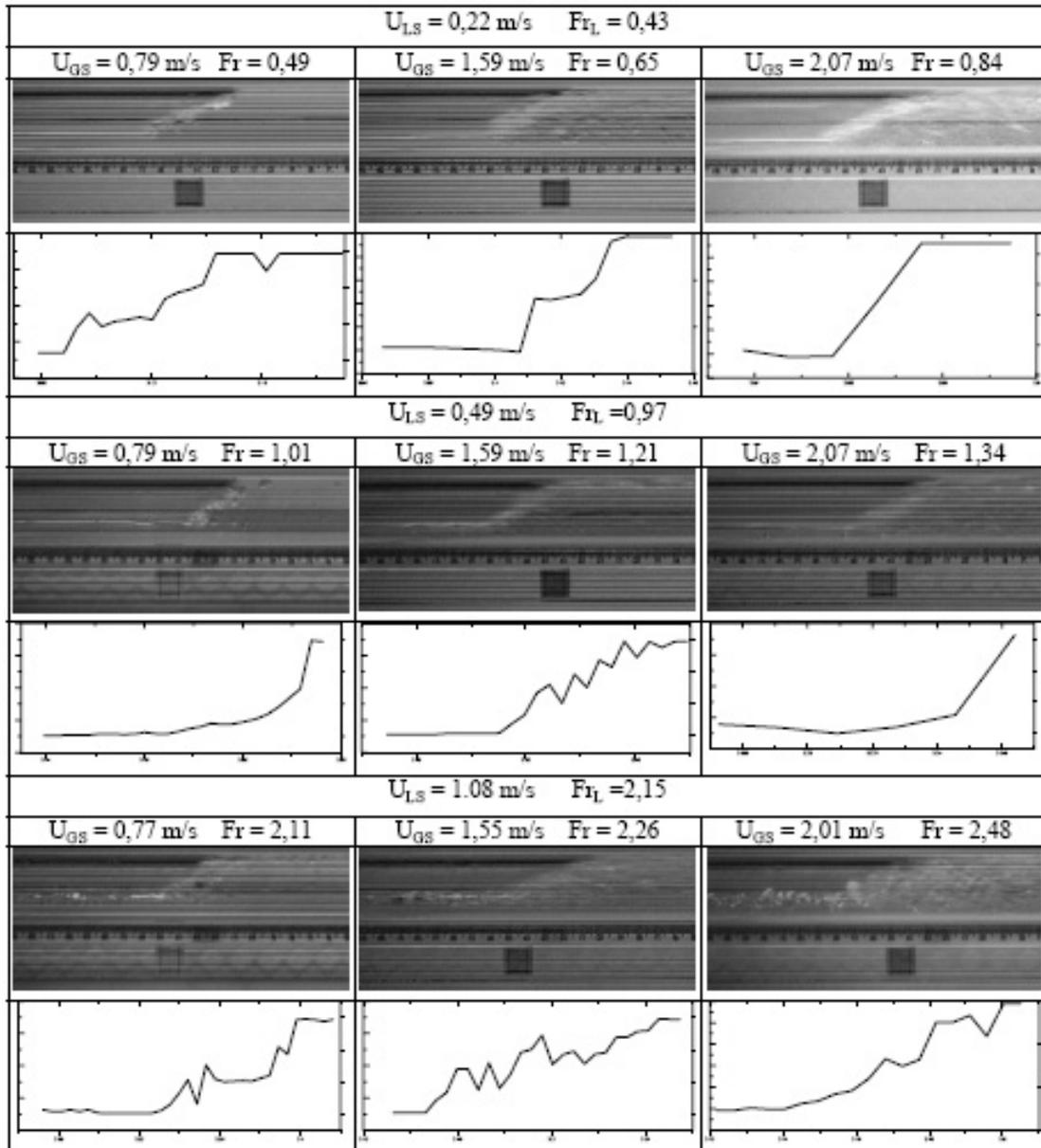


Figura 6.44: Imagens dos perfis das caudas das bolhas alongadas obtidas pela técnicas de visualização e ultra-sônica - Escoamento de $+5^\circ$.

A figura 6.45 apresenta os perfis da cauda da bolha alongada obtidos, respectivamente, pelas técnicas por visualização e ultra-sônica para o escoamento ascendente de $+10^\circ$. O comportamento da variação dos perfis longitudinais em relação as velocidades superficiais das fases também foi semelhante ao do escoamento horizontal, porém observa-se pela técnica de visualização uma maior aeração dos pistões de líquido em razão do forte desprendimento de bolhas. Isso também pode ser observado nos perfis obtidos pela técnica ultra-sônica onde, após o término da cauda, são observados picos oriundos da reflexão das ondas ultra-sônicas pelas bolhas dispersas no pistão de líquido.

No presente trabalho o ciclo de geração de pulsos sobre o transdutor ultra-sônico correspondeu a uma frequência de excitação de 230 Hz , adotada em razão da capacidade da memória da CPU utilizada. Para melhor definição dos perfis da cauda deveriam ter sido utilizadas frequências maiores que possibilitassem a obtenção de mais pontos e a assim gráficos com melhor definição do perfil da cauda.

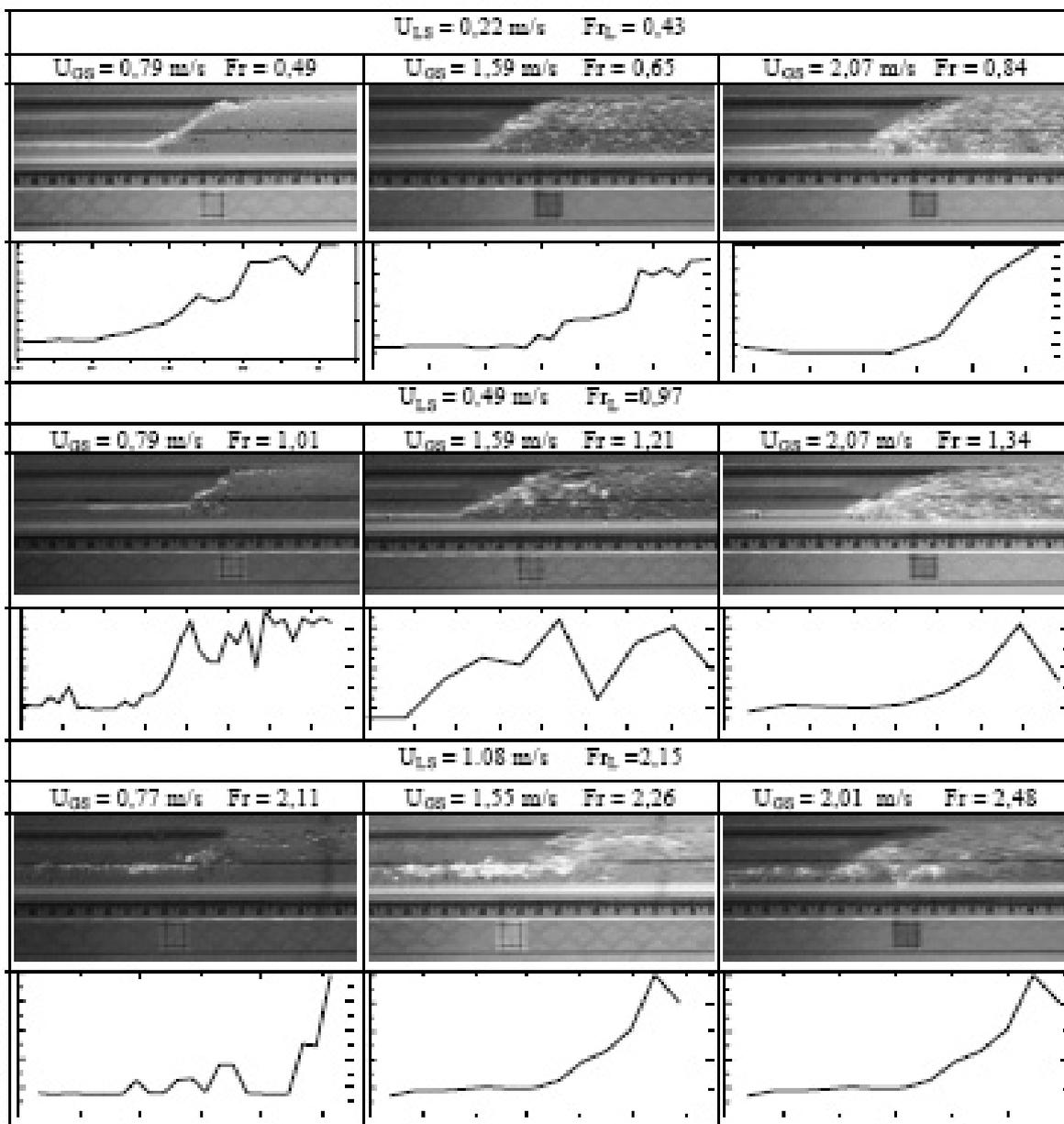


Figura 6.45: Imagens dos perfis das caudas das bolhas alongadas obtidas pela técnicas de visualização e ultra-sônica - Escoamento de $+10^\circ$.

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho desenvolvido, conforme os resultados experimentais apresentados no Capítulo 6, em seguida são apresentadas às sugestões para trabalhos futuros.

7.1 Conclusões

Neste trabalho foi projetada e construída uma seção de testes inclinada para escoamento bifásico ar-água em uma tubulação de diâmetro interno 25,6 mm. Realizou-se o desenvolvimento de uma técnica ultra-sônica pulso-eco de alta velocidade e a instalação do sistema de registro de imagens para em conjunto medir as velocidades e comprimentos das bolhas alongadas e dos pistões de líquido em nove diferentes pares de velocidades superficiais gás-líquido nos escoamentos horizontal, inclinado ascendente de 5° e 10° e inclinado descendente de $-2,5^\circ$ e -5° . Por último foi realizado o estudo do perfil da cauda da bolha alongada. Em paralelo realizou-se o estudo do campo ultra-sônico. Chegando-se as seguintes conclusões:

- Do estudo do campo ultra-sônico verificou-se que o transdutor de 10 MHz e diâmetro de $\frac{1}{4}$ " forneceu ao sistema ultra-sônico sinais com melhor definição.
- O sistema ultra-sônico da alta velocidade foi capaz de medir e registrar os tempos de propagação da onda ultra-sônica com um intervalo de tempo bem inferior ao tempo de passagem das interfaces ar-água, também permitiu a aná-

lise dos sinais ultra-sônicos em regiões do escoamento intermitente de grande aeração. Foi possível visualizar a interface da cauda da bolha alongada e relacionar seu perfil com características do escoamento, porém é necessário utilizar uma frequência maior de pulsos de excitação sobre o transdutor ultra-sônico para obter melhor definição da interface.

- O par de transdutores ultra-sônicos localizados na parte inferior do tubo permitiu melhor tratamento dos sinais,
- A comparação dos parâmetros medidos pela técnica ultra-sônica de alta velocidade com a técnica por visualização apresentou boa concordância, apresentando, na maioria dos parâmetros medidos, uma diferença relativa abaixo de 10%, embora em alguns poucos pontos ocorreram valores acima, porém não superior a 24%.
- Aplicando-se a técnica de visualização verificou-se que no escoamento ascendente ocorreu redução da região do padrão de escoamento estratificado e ampliação da região do padrão de escoamento intermitente. Já no escoamento descendente ocorreu o contrário.
- Verificou-se que, mantida a velocidade superficial do líquido constante, os valores das velocidades do nariz e das velocidades médias das bolhas alongadas aumentavam à medida que a velocidade superficial do gás aumentava, apresentado um forte coeficiente de correlação linear entre essas variáveis. Também se verificou que, mantida a velocidade superficial do gás constante, os valores das velocidades do nariz e das velocidades médias das bolhas alongadas aumentavam à medida que a velocidade superficial do líquido aumentava.
- Nos escoamentos horizontal e inclinado ascendente de 5° e 10° verificou-se que, mantida a velocidade superficial do líquido constante, ocorreu o crescimento do comprimento da bolha alongada à medida que a velocidade superficial do gás aumentou, apresentando um coeficiente de correlação com forte dependência linear entre as variáveis. Também verificou-se que, mantida a velocidade superficial do gás constante, ocorreu redução do comprimento da bolha alongada

à medida que a velocidade superficial do líquido aumentou. Nos escoamentos com ângulos de inclinação negativos não foi verificado o mesmo comportamento. No escoamento descendente de $-2,5^\circ$ ocorreu uma pequena redução no comprimento seguido de rápido aumento à proporção que aumentou a velocidade superficial do gás e no escoamento descendente de -5° ocorreu uma fraca tendência de aumento no comprimento da bolha alongada à medida que a velocidade superficial do gás aumentou. Há uma indicação que quando o sentido da força de empuxo coincide com a do escoamento, ocorre aumento do comprimento da bolha alongada à medida que a velocidade superficial do gás aumenta e quando os sentidos não coincidem, o comprimento da bolha não apresenta um comportamento bem definido em relação a variação da velocidade superficial do gás.

- Foram comparados os valores da velocidade do nariz da bolha medidos pela técnica ultra-sônica e de visualização com as correlações propostas por Bendiksen (1984) e Cook e Behnia (2001). Os valores obtidos pelas correlações sempre apresentaram valores superiores aos medidos pelas duas técnicas, indicando que sobrestimam os valores para a faixa de ângulos de escoamento estudado.
- A bolha alongada, ao variar ângulo de inclinação de -5° a 10° , apresentou redução de comprimento na menor velocidade superficial de gás estudada $U_{GS} = 0,77 \text{ m/s}$ e nas maiores velocidades, $U_{GS} = 1,55 \text{ m/s}$ e $U_{GS} = 1,95 \text{ m/s}$, ocorreu aumento ao variar de $-2,5^\circ$ a 0° , voltando a reduzir o comprimento ao variar de 0° a 10° . Esse comportamento pode estar relacionado com o desprendimento das bolhas das caudas, pois se verificou que há mudanças no perfil e no comprimento da cauda.
- Verificou-se que a velocidade do nariz da bolha alongada diminui com o aumento do ângulo de inclinação ao variar de -5° a 10° em relação a horizontal. O desprendimento das bolhas da cauda aumenta à medida que aumenta o ângulo de escoamento, sendo as bolhas desprendidas incorporadas ao nariz da bolha alongada que vem em seguida. Essas incorporações devem provocar um

retardamento da velocidade.

7.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- A construção da seção de testes inclinada permitirá o estudo de parâmetros interfaciais em escoamentos com ângulo de inclinação de $(+10^\circ)$, $(+5^\circ)$, $(+2, 5^\circ)$, (0°) , $(-2, 5^\circ)$, (-5°) e (-10°) , assim parâmetros interfaciais como fração de vazio, espessura do filme de líquido e velocidade de arraste da bolha alongada poderão ser estudados utilizando-se as técnicas ultra-sônica e de visualização.
- O sistema ultra-sônico de alta velocidade pode ser aprimorado através da melhoria do programa da aquisição e registro dos sinais ultra-sônicos a fim de se obter sinais com menores ruídos e permitir a utilização do sistema ultra-sônico em regiões do escoamento intermitente de alta aeração. Também pode ser desenvolvido um programa específico para tratamento dos sinais, possibilitando a medição dos parâmetros estudados em tempo real.
- A técnica ultra-sônica de alta velocidade foi aplicada no tubo de acrílico, o passo seguinte seria a aplicação em tubo de aço inoxidável que é o material normalmente encontrado em plantas nucleares e que devido à sua constituição metalográfica provoca espalhamento da onda ultra-sônica e maiores dificuldades no tratamento dos sinais.
- A comparação entre a média da velocidade do nariz e da cauda da bolha alongada mostrou que os escoamentos estudados não estavam hidrodinamicamente desenvolvidos, porém próximos da estabilidade. Portanto é importante um estudo da ampliação da seção de testes visando alcançar escoamentos plenamente desenvolvidos.
- Mais pares de velocidades superficiais devem ser estudados para se obter melhores conclusões de resultados.
- Os perfis da célula unitária do escoamento intermitente é um importante parâmetro a ser estudado, tanto para obtenção da fração de vazio quanto para

entender melhor as características do escoamento. Um estudo relacionando as velocidades das interfaces com a frequência de geração de pulsos sobre o transdutor ultra-sônico é importante para melhorar a definição do perfil da bolha alongada.

- A sincronização de aquisição de dados das técnicas ultra-sônica e de visualização permitirá a comparação dos eventos em tempo real e assim uma melhor análise dos resultados.

Referências Bibliográficas

- Abdul-Majeed, G. H. (2000). Liquid slug holdup in horizontal and slightly inclined two-phase slug flow. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 27:27 – 32.
- Anderson, V. C. (1950). Sound scattering from a fluid sphere. *Journal of the Acoustical Society of American*, 22:426–431.
- Andreussi, P. e Bendiksen, K. (1989). An investigation of void fraction in liquid slugs for horizontal and inclined gas-liquid pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 15:937 – 946.
- Baker, O. (1954). Designing for simultaneous flow oil and gas. *Oil and Gas Journal*, 12:185–195.
- Barnea, D. e Brauner, N. (1985). Holdup of the liquid slug in two-phase intermittent flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 11:43–49.
- Barnea, D., Shoham, O., e Dukler, A. E. (1980). Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 6:217–225.
- Barnea, D. e Taitel, Y. (1993). Kelvin-hermholtz stability criteria for stratified flow: viscous non-viscous (inviscid) approaches. *International Journal of Multiphase Flow*, 19:639–649.
- Beggs, H. D. e Brill, J. P. (1973). A study of two-phase flow in inclined pipes. *Journal of Petroleum Technology*, 25:607–617.
- Bendiksen, K. H. (1984). An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 10:467–483.

- Bendiksen, K. H. e Espedal, M. (1992). Onset of slugging in horizontal gas-liquid pipe flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 18:237–247.
- Benjamin, T. B. (1968). Gravity currents and related phenomena. *Journal Fluid Mechanics*, 31:209–248.
- Bonnecaze, R. H., Erkine, J., e Greskovich, E. J. (1971). Holdup and pressure drop for two-phase flow in inclined pipelines. *AIChE Journal*, 17:1109–1113.
- Boyer, C., Duquenne, A., e Wild, G. (2002). Measuring techniques in gas-liquid and gas-liquid-solid reactors. *Chemical Engineering Journal*, 57:3185–3215.
- Bröring, S., Fischer, J., Korte, T., Sollinger, S., e Lübbert, A. (1991). Flow structure of the dispersed gasphase in real multiphase chemical reactors investigated by a new ultrasound-doppler technique. *Journal of Chemical Engineering*, 69:1247–1256.
- Chang, J. S. (1989). Stratified gas-liquid two-phase electrohydrodynamics in horizontal pipe flow. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 25:241–247.
- Chang, J. S., Ichikawa, Y., Irons, G. A., Morala, E. C., e Wan, P. T. (1984). Void fraction measurement by an ultrasonic transmission technique in bubbly gas-liquid two-phase flow. *IUTAM Symposium of Measurement Techniques in Gas-Liquid Two-Phase Flow - Nancy, France*.
- Chang, J. S. e Morala, E. C. (1990). Determination of two-phase interfacial areas by an ultrasonic technique. *Nuclear Engineering and Design*, 122:143 – 156.
- Cho, J., Perlin, M., e Ceccio, S. L. (2005). Measurement of near-wall stratified bubbly flows using electrical impedance. *Measurement Science and Technology*, 16:1021–1029.
- Coddington, P. e Macian, P. (2002). A study of the performance of void fraction correlations used in the context of drift-flux two-phase models. *Nuclear Engineering and Design*, 215:199–216.

- Collier, J. G. e Thome, J. R. (1996). *Convective Boiling and Condensation*. Oxford University Press.
- Cook, M. e Behnia, M. (2000). Slug lenght prediction in near horizontal gas-liquid intermittent flow. *Chemical Engineering Science*, 55:2009–2018.
- Cook, M. e Behnia, M. (2001). Bubble motion during inclined intermittent flow. *Heat and Fluid Flow*, 22:543–551.
- Divora, B., Ovadia, S., e Yeshuda, T. (1980). Flow pattern characterization in two-phase flow by electrical conductance probe. *International Journal of Multiphase Flow*, 6:386–397.
- Dukler, A. E. e Hubbard, M. G. (1975). A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. *Industrial. Engineering Chemistry Fundamentals*, 14:337–347.
- Dukler, A. E., Maron, D. M., e Brauner, N. (1985). A physical model for predicting the minimum stable slug lenght. *Chemistry Engineering Science*, 40:1379–1385.
- Faccini, J. L. H., Harvel, G. D., Su, J., e Chang, J. S. (2004). An advanced ultrasonic technique for flow and void fraction measurements of two-phase flow. *Proc. of ICON12*.
- Faccini, J. L. H., Sampaio, P. A. B., e Su, J. (2006). Experimental study of horizontal plug flow by ultrasonic and visualization techniques. *Proc. of ENCIT*.
- Faccini, J. L. H., Sampaio, P. A. B., e Su, J. (2007). Assessment of intermittent two-phase flow using a high-speed visualization technique. *Proceeding of XV ENFIR-National Meeting of Reactor Physics and Thermal Hydraulics - International Nuclear Atlantic Conference - Santos, SP, Brasil*.
- Faccini., J. L. H., Sampaio, P. A. B., e Su, J. (2008). Estudos experimentais e numéricos de escoamentos bifásicos gás-líquido em duto circular horizontal. *Proc. of EBECEM*.

- Fagundes, J. R., Fabre, J., e Peresson, L. (1999). Shape of long bubbles in horizontal slug flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 25:1129–1160.
- Felizola, H. e Shoham, O. (1995). A unified model for slug flow in upward inclined pipes. *Journal of Energy Resources Technology*, 117:7–12.
- Ferré, D. (1979). Ecoulements diphasiques a poches en conduit horizontale. *Rev. Institut Francais du Petrole*, 34:113–142.
- Filho, J. S. C. (2004). Metodologia ultra-sônica para caracterização de escoamento bi-fásico. Master's thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro.
- Filho, J. S. C., Faccini, J. L. H., Lamy, C. A., e Su, J. (2009). Measurement of velocity and shape of elongated bubble in a horizontal two-phase gas-liquid flow using a high speed ultrasonic system. *20th International Congress of Mechanical Engineering - Gramado, RG, Brasil*.
- Filho, J. S. C., Lamy, C. A., Faccini, J. L. H., e Su, J. (2008). Estudos experimentais da interação do campo ultra-sônico com esferas de aço imersas em água simulando bolhas de ar. *Proc. of EBCEM*.
- Fossa, M., Guglielmini, G., e Marchitto, A. (2003). Intermittent flow parameters from void fraction. *Flow Measurement and Instrumentation*, 14:161–168.
- Freire, A. P. S., Ilha, A., e Colaço, M. J. (2006). *Anais da V Escola de Primavera em Transição e Turbulência-Tomo 1*. Associação Brasileira de Ciências e Engenharia Mecânica.
- Gómez, F. R., Soler, M. A. F., Mprcillo, G. D., Martínez, C. V., Roldán, A. A., Pascual, A. S., e Rubalcaba, J. S. R. (1980). *Introducción a los Métodos de Ensayos No Destructivos de de la Calidad de los Materiales*. Instituto Nacional de Tecnica Aeroespacial - INTA.
- Gregory, G. A., Nicholson, M. K., e Aziz, K. (1978). Correlation of the liquid volume fraction in the slug for horizontal gas-liquid slug flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 1:33–39.

- Grotjahn, K. e Mewes, D. (2001). Measurement and calculations on the transient behavior of two-phase slug flow in a horizontal pipe. *4th International Conference on Multiphase Flow - New Orleans, Louisiana USA*.
- Hale, C. P. (2000). *Slug formation, growth and decay in gas-liquid flows*. PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London.
- Harvel, G. D., Hori, K., Kawanishi, K., e Chang, J. S. (1996). Real-time cross-sectional averaged void fraction measurement in vertical annulus gas-liquid two-phase flow by neutron radiography and x-ray tomography techniques. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 371:544 – 552.
- Hasegawa, T., Annou, H. N. Y. H. A., Kato, M., e Inoue, N. (1992). Acoustic scattering by a rigid sphere in the field of waves emanating from circular concave radiator. *Journal of the Acoustical Society of American*, 6:3116–3120.
- Hayman, A. J. e Weight, J. P. (1979). Transmission and reception of short ultrasonic pulses by circular and square transducers. *Journal of the Acoustical Society of American*, 66:945–951.
- Heindel, T. J. (2000). Gas flow regime changes in a bubble column filled with a fibre suspension. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 78:1017–1022.
- Hogset, S. e Ishii, M. (1997). Local two-phase flow measurement using sensor techniques. *Nuclear Engineering Design*, 175:15–24.
- Issa, R. I. e Kempf, M. H. W. (2003). Simulation of slugs flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model. *International Journal of Multiphase Flow*, 29:69–95.
- Jones, O. C. J. e Delhaye, J. M. (1976). Transient and statistical measurement techniques for two-phase flows: a critical review. *International Journal of Multiphase Flow*, 3:89 – 116.
- Kordyban, E. S. e Ranov, T. (1970). Mechanism of slug formation in horizontal two-phase flow. *Journal of Basic Engineering, T.A.S.M.E.*, páginas 857 – 864.

- Krautkrämer, J. e Krautkrämer, H. (1990). *Physical principles of ultrasonic testing of materials*. Springer-Verlag.
- Kumar, S. B., Moslemian, D., e Dudukovic, M. P. (1995). A gamma-ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems. *Flow Measurement Instrumentation*, 6:61–73.
- Kuttruff, H. (1991). *Ultrasonis Fundamentals and Applications*. Elsevier Applied Science.
- Lage, P. L. C. e Esposito, R. O. (1999). Experimental determination of bubble size distributions in bubble columns: prediction of mean bubble diameter and gas hold up. *Powder Technology*, 2:142–150.
- Lamy, C. A., Filho, J. S. C., Faccini, J. L. H., e Su, J. (2007a). Experimental investigation of attenuation of ultrasonic field in a circular pipe by a spherical body. *Proc. of INAC*.
- Lamy, C. A., Filho, J. S. C., Faccini, J. L. H., e Su, J. (2007b). Experimental investigation of ultrasonic field in two-phase bubbly-flow using rigid sphere. *Proc. of COBEM*.
- Lin, P. Y. e Hanratty, T. J. (1987). Effect of pipe diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 13:549–563.
- Lindken, R. e Merzkirch, W. (2002). A novel piv technique for measurements in multiphase flows and its application to two-phase bubbly flows. *Experiments in Fluids*, 33:814–825.
- Lioumbas, J. S., Paras, S. V., e Karabelas, A. J. (2005). Co-current stratified gas-liquid downflow - influence of the liquid flow field on interfacial structure. *International Journal of Multiphase Flow*, 31:869 – 896.
- Lubbers, J. e Graaf, R. (1998). A simple and accurate formula for the sound velocity in water. *Ultrasound in Medicine and Biology*, 24:1065–1068.

- Luiz, L. C. (2007). Visualização de escoamento bifásicos em tubulações metálica por neutrografia em tempo real. Master's thesis, COPPE/UFRJ.
- Mandhane, J. M., Gregory, G. A., e Aziz, K. (1974). A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1:537–553.
- Manolis, I. G. (1995). *High Pressure Gas-Liquid Slug Flow*. PhD thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, UK.
- Masala, T. (2004). High-speed ultrasonic pulse-echo for two phase flow measurement. Master's thesis, McMaster University.
- Matikainen, L., Irons, G. A., Morala, E., e et al. (1986). Ultrasonic system for the detection of transient liquid gas interfaces using the pulse-echo technique. *Review Of Scientific Instruments*, 57:1661–1666.
- Matsui, G. (1984). Identification of flow regimes in vertical gas liquid two-phase flow using differential pressure fluctuations. *International Journal of Multiphase Flow*, 10:711–720.
- Morala, E. C., Cheong, D., Wan, P. T., Irons, G. A., e Chang, J. S. (1984). Ultrasonic wave propagation in a bubbly gas-liquid two-phase flow. *Paper presented at the Multi-Phase Flow and Heat Transfer*, páginas 501–512.
- Mukherjee, H. e Brill, J. P. (1983). Liquid holdup correlations for inclined two-phase flow. *Journal of Petroleum Technology*, 35:1003–1008.
- Nader, G. (2002). *Desenvolvimento de Técnicas de Caracterização de Transdutores Piezoelétricos*. PhD thesis, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Nepomuceno, L. X. (1980). *Tecnologia Ultra-sônica*. Edgar Blücher.
- Nicholson, M. K., Aziz, K., e Gregory, G. A. (1978). Intermittent two phase flow in horizontal pipes: predictive models. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 56:653–663.

- Nicklin, D. J., Wilkes, J. O., e Davidson, J. F. (1962). Two phase flow in vertical tubes. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 40:61–68.
- Nydal, O. J., Pintus, S., e Andreussi, P. (1992). Statistical characterization of slug flow in horizontal pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 18:439–453.
- Oliemans, R. V. A. e Pots, B. F. M. (2006). *Multiphase Flow Handbook - Gas-Liquid Transport in Ducts*. Hemisphere Publishing.
- Papadakis, E. P. (1965a). Revised grain-scattering formulae and tables. *Journal of the Acoustical Society of American*, 37:703–710.
- Papadakis, E. P. (1965b). Ultrasonic attenuation caused by scattering in polycrystalline metals. *Journal of the Acoustic Society of America*, 37:711–717.
- Petalas, N. e Aziz, K. (1998). A mechanistic model for multiphase flow in pipes. *Proc. of 49th Annual Technical Meeting of the Petroleum Society of the Canadian Institute - Canada*.
- Pinto, A. M. F. R., Pinheiro, M. N. C., e Campos, B. J. L. M. (1998). Coalescence of two gas slugs rising in a co-current flowing liquid in vertical tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 51:2973–2983.
- Povey, M. J. W. (1997). *Ultrasonic Techniques for Fluids Characterization*. Academic Press.
- Roitberg, E., Shemer, L., e Barnea, D. (2008). Hydrodynamic characteristics of gas-liquid slug flow in a downward inclined pipe. *Chemical Engineering Science*, 63:3605–3613.
- Rosa, E. S. (2004). Flow structure in the horizontal slug flow. *Thermal Engineering*, 3:151–160.
- Ruder, Z., Hanratty, P. J., e Hanratty, T. J. (1989). Necessary conditions for the existence of stable slugs. *International Journal of Multiphase Flow*, 15:209–226.
- Santos, C. (2007). *Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem*. Edições Sílabo - Porto.

- Serizawa, S., Kataoka, I., e Michiyoshi, I. (1975). Turbulence structure of air-water bubbly flow - ii local properties. *International Journal of Multiphase Flow*, 46:235–246.
- Spedding, P. L. e Nguyen, V. T. (1980). Regime maps for air water two phase flow. *Chemical Engineering Science*, 35:779–793.
- Spedding, P. L. e Spence, D. R. (1993). Flow regimes in two-phase gas-liquid flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 19:245–280.
- Sthal, P. e von Rohr, P. R. (2004). On the accuracy of void fraction measurements by single-beam gama-densitometry for gas-liquid two-phase flows in pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 28:533–544.
- Stravs, A. A. e Stockar, U. (1985a). Measurement of number and size distributions of reflecting objects by pulsed ultrasound. *Journal of the Acoustical Society of American*, 4:1419–1424.
- Stravs, A. A. e Stockar, U. V. (1985b). Measurement of interfacial-areas in gas-liquid dispersions by ultrasonic pulse transmission. *Chemical Engineering Science*, 40:1169–1175.
- Taitel, Y. e Dukler, A. E. (1976). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22:47–55.
- Takenaka, N., Asano, H., Fujii, T., e Yoshii, K. (1999). Application of fast neutron radiography to three-dimensional visualization of steady two-phase flow in a rod bundle. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A424:73–76.
- Todreas, N. E. e Kazimi, M. S. (1990). *Nuclear Systems II - Elements of Thermal Hydraulic Design*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Tutu, N. K. (1982). Pressure fluctuations and flow pattern recognition in vertical two-phase gas-liquid flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 8:443–447.

- Urick, R. J. (1967). *Principles of Underwater Sound for Engineers*. McGraw-Hill Book Company.
- Wada, S., Kikura, H., e Aritomi, M. (2006). Pattern recognition and signal processing of ultrasonic echo signal on two-phase flow. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17:207 – 224.
- Wang, X., Guo, L., e Zhang, X. (2006). Development of liquid slug length in gas-liquid slug flow along horizontal pipeline: Experiment and simulation. *Chinese J. Chem. Eng.*, 14:626–633.
- Weber, M. E. (1981). Drift in intermittent two-phase flow in horizontal pipes. *Canadian Journal of Chemical*, 90:398–399.
- Weber, M. E., Alarie, A., e Ryan, M. E. (1986). Velocities of extended bubbles in inclined tubes. *Chemical Engineering Science*, 41:2235–2240.
- Weight, J. P. e Hayman, A. J. (1978). Observations of the propagation of very short ultrasonic pulses in their reflection by small targets. *Journal of the Acoustical Society of American*, 63:396–404.
- Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J., e Crawford, T. (1979). Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines. *International Journal of Multiphase Flow*, 7:271–291.
- Woldesemayat, M. A. e Ghajar, A. J. (2007). Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 33:347–370.
- Zukoski, E. E. (1966). Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. *Journal of Fluid Mechanics*, 25:821–837.

Apêndice I

Calibração Estática por Comparação do Sistema Ultra-Sônico

O tubo de acrílico era preenchido, gradativamente, com um volume conhecido de água filtrada e destilada, por meio de uma seringa graduada de $20 \pm 2,5$ ml através do furo no tampão. Um termopar do tipo K, com 1,5 mm de diâmetro, imerso na água fornecia os valores da temperatura lidas em um termômetro digital de 4 1/2 dígitos da marca ECB, modelo MDT-2000-K. Para cada volume de água injetado correspondia uma altura h_L de líquido no fundo do tubo. Medindo-se o tempo de trânsito da onda ultra-sônica, a altura h_L foi obtida da equação

$$h_L = c \frac{\delta t}{2} \quad (1)$$

Apêndice II

Resultados da Interação do Campo Ultra-Sônico com a Esfera de Diâmetro 3/16" e Campos Mortos Gerados

Deslocamento Horizontal da Esfera de Diâmetro 3/16" à Partir do Ponto $C1$

Nesta seção será apresentado o estudo da interação da esfera de 3/16" com o campo ultra-sônico gerado pelos transdutores de 5MHz e 10MHz ao se deslocar ao longo do eixo x da seção transversal do tubo. Serão analisadas as técnicas ultra-sônicas pela reflexão da esfera e pelo eco de fundo, utilizando-se os processamentos de sinais pela área sob a curva do pulso refletido e pelo pico a pico do mesmo pulso. A tabela 1 apresenta um resumo dos itens a serem analisados.

Tabela 1: Resumo dos Processo de Sinais Ultra-Sônicos.

TRANSDUTOR	TÉCNICA ULTRA-SÔNICA	
	REFLEXÃO DA ESFERA	ECO DE FUNDO
5 MHz	ÁREA SOB A CURVA	PICO A PICO
10 MHz	ÁREA SOB A CURVA	PICO A PICO

1. TRANSDUTOR $5MHz$ - PROCESSAMENTO DO SINAL ATRAVÉS DA ÁREA SOB A CURVA

A figura 1(a) apresenta o gráfico referente a interação da esfera com o campo ultra-sônico ao longo de seu deslocamento horizontal. O eixo vertical representa as ondas ultra-sônicas refletidas pela esfera através do processamento de sinais obtido pela área sob a curva. Com a esfera inicialmente posicionada em $C1$, centro do tubo ($x = 0$), ocorre o maior valor da área sob a curva. À medida que a esfera se desloca horizontalmente, tanto para a direita quanto para a esquerda, ocorre rapidamente a redução do sinal refletido por ela.

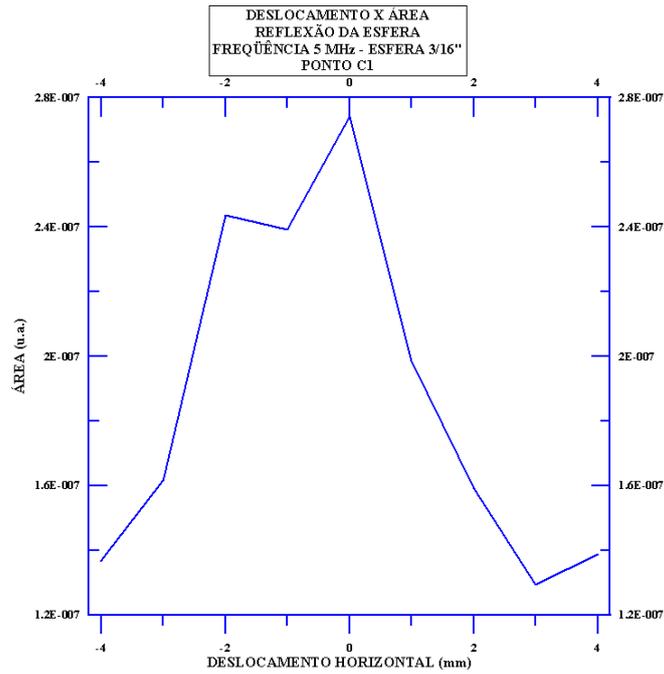
A figura 1(b) se refere às mesmas condições de interação entre a esfera e o campo ultra-sônico descrito anteriormente, porém os sinais analisados são do eco de fundo e não da reflexão da esfera. Como o comprimento da onda ultra-sônica é bem menor do que o diâmetro da esfera, não ocorre o fenômeno da difração e a esfera atua como um refletor, ou um “filtro mecânico”, refletindo toda onda ultra-sônica incidente sobre si e assim atenuando o sinal do eco de fundo. À medida que ocorre o deslocamento da esfera, tanto para a esquerda quanto para a direita, ocorre um contínuo aumento do valor da área sob a curva em razão da maior incidência das ondas ultra-sônicas sobre a parede de fundo. Observa-se que pequenos deslocamentos da esfera, da ordem de um milímetro, ocorrem sensíveis variações da área sob a curva.

As duas curvas das figuras anteriores foram plotadas em um único gráfico, conforme figura 2, com o intuito de realizar a comparação entre as técnicas ultra-sônicas utilizadas (reflexão da esfera e eco de fundo). Desta figura observa-se que os valores obtidos da área sob a curva utilizando a técnica pela reflexão da esfera apresenta valores bem menores que os obtidos utilizando a técnica do eco de fundo. Observa-se também, que a percepção do transdutor em relação as ondas ultra-sônicas refletidas pela esfera, durante o deslocamento horizontal é bem menor do que a do eco de fundo.

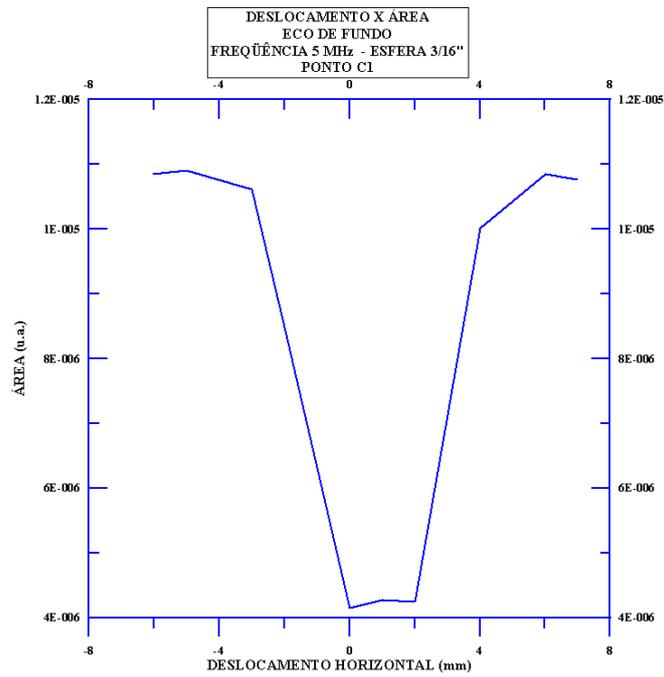
A esfera ao interagir com o campo ultra-sônico, utilizando a técnica ultra-sônica por pulso-eco ou pela técnica por transmissão, provoca a atenuação

do pulso ultra-sônico que retorna ao transdutor. Segundo Stravs e Stockar (1985b) e Morala et al. (1984) a atenuação do sinal ultra-sônico é proporcional a área projetada da seção transversal da esfera que interage com o campo ultra-sônico. Desconsiderando a impedância acústica entre os meios, a esfera apresenta uma reflexão especular e a atenuação do eco de fundo será basicamente a diferença entre a intensidade do pulso ultra-sônico emitido pelo transdutor menos o pulso refletido pela superfície especular. O princípio da técnica ultra-sônica através do eco de fundo é baseado na atenuação descrita anteriormente e demonstra sensibilidade do transdutor em relação ao deslocamento horizontal da esfera. Os valores da atenuação expressos nos gráfico anteriores em unidades de área, permitem fácil leitura e identificação da posição da esfera para pequenos deslocamentos como $1mm$.

Segundo Urick (1967) a maior intensidade do pulso ultra-sônico refletido por um objeto esférico ocorre quando seu feixe incide perpendicularmente a esta superfície. Portanto a maior intensidade do pulso ultra-sônico, refletido pela esfera e captado pelo transdutor, ocorre quando os eixos do feixe ultra-sônico e da esfera apresentam mesma direção. A coincidência entre as direções dos feixes ocorre em um ponto específico da esfera, pequenos mentos em relação a este ponto provocam grandes variações do ângulo de reflexão, direcionando o sinal refletido para longe do transdutor. Por essa razão a técnica ultra-sônica baseada na reflexão da esfera apresenta baixos valores da amplitude de reflexão e a sensibilidade do transdutor em relação ao deslocamento da esfera corresponde a poucos milímetros.



a)



b)

Figura 1: (a) Reflexão da esfera - frequência 5MHz, esfera $\phi 3/16''$; (b) Eco de fundo - frequência 5MHz, esfera $\phi 3/16''$.

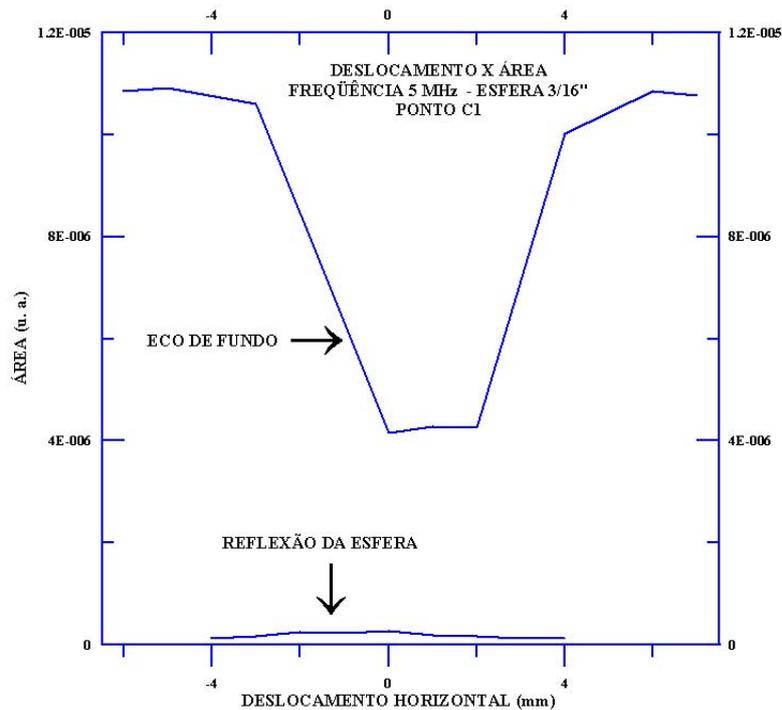


Figura 2: Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através da unidade de área - frequência 5MHz, esfera $\phi 3/16''$.

2. TRANSDUTOR 5MHz - PROCESSAMENTO DO SINAL ATRAVÉS DO PICO A PICO

A figura 3 mostra a interação da esfera com o campo ultra-sônico nas mesmas condições descritas anteriormente, porém, utilizando o processamento do sinal através do pico a pico. Os sinais obtidos por este processamento (*pico a pico*) geraram curvas semelhantes aquelas obtidas utilizando a área sob a curva ocorrendo, ou seja, à medida que a esfera se deslocou do ponto de referência, ocorreu redução da intensidade de reflexão da esfera e aumento da amplitude do eco de fundo. Observa-se, também, o mesmo comportamento em relação à percepção do deslocamento da esfera pelo transdutor, ou seja, baixa percepção do transdutor quando se utiliza a técnica ultra-sônica pela reflexão da esfera e boa percepção quando se utiliza o eco de fundo.

3. TRANSDUTOR 10MHz - PROCESSAMENTO DO SINAL ATRAVÉS DA

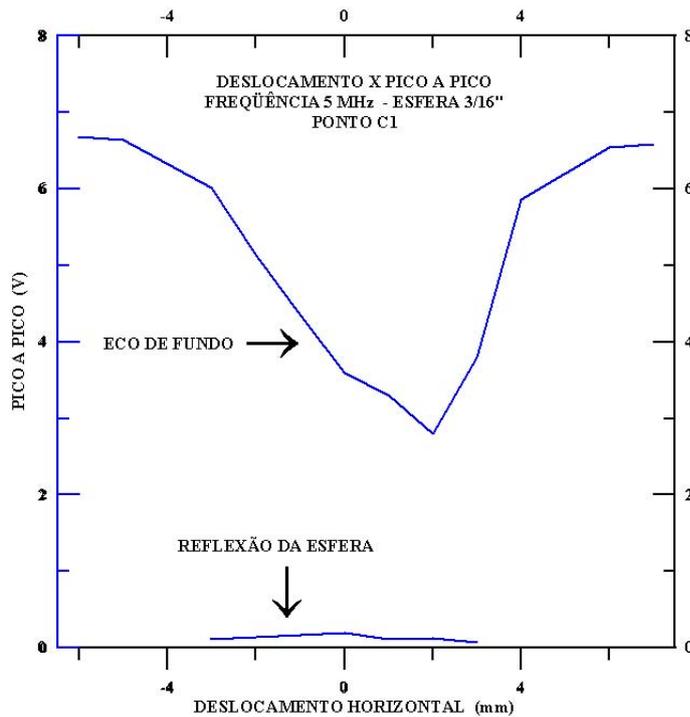


Figura 3: Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através do pico a pico - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$.

ÁREA SOB A CURVA

A figura 4 apresenta o gráfico referente à interação da esfera com o campo ultra-sônico ao longo de seu deslocamento horizontal. O eixo vertical representa as ondas ultra-sônicas refletidas pela esfera através do processamento de sinais obtido pela área sob a curva. Este gráfico é semelhante ao gráfico 2, porém o campo ultra-sônico é gerado pelo transdutor de frequência $10MHz$. Analisando os dois gráficos, observa-se que na aplicação da técnica ultra-sônica pela reflexão da esfera a percepção do deslocamento da esfera pelo transdutor de $10MHz/\phi 1/4''$ foi um pouco menor do que o de $5MHz/\phi 1/2''$, provavelmente em razão de o primeiro ter um diâmetro menor que o segundo. A percepção do deslocamento da esfera utilizando a técnica ultra-sônica eco de fundo praticamente foi à mesma nos dois gráficos.

4. TRANSDUTOR $10MHz$ - PROCESSAMENTO DO SINAL ATRAVÉS DO PICO A PICO

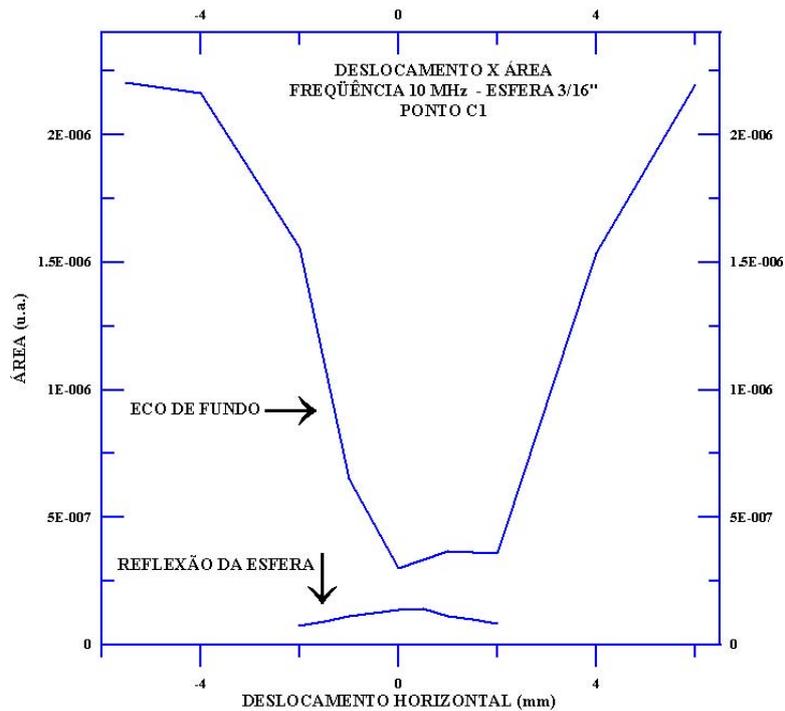


Figura 4: Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através da área sob a curva - frequência $10MHz$, esfera $\phi 3/16''$.

A figura 5 mostra a interação da esfera com o campo ultra-sônico gerado pelo transdutor de $10MHz$, utilizando as duas técnicas ultra-sônicas e o processamento do sinal através do pico a pico. Este gráfico é semelhante ao gráfico da 3, cuja frequência é de $5MHz$. A análise e observações em relação à percepção do transdutor são as mesmas descritas no item anterior. Como os valores das amplitudes de reflexão variam de acordo com a maneira como o transdutor é acoplado a superfície do tubo, não se pode fazer uma comparação entre amplitudes de sinais de transdutores diferentes.

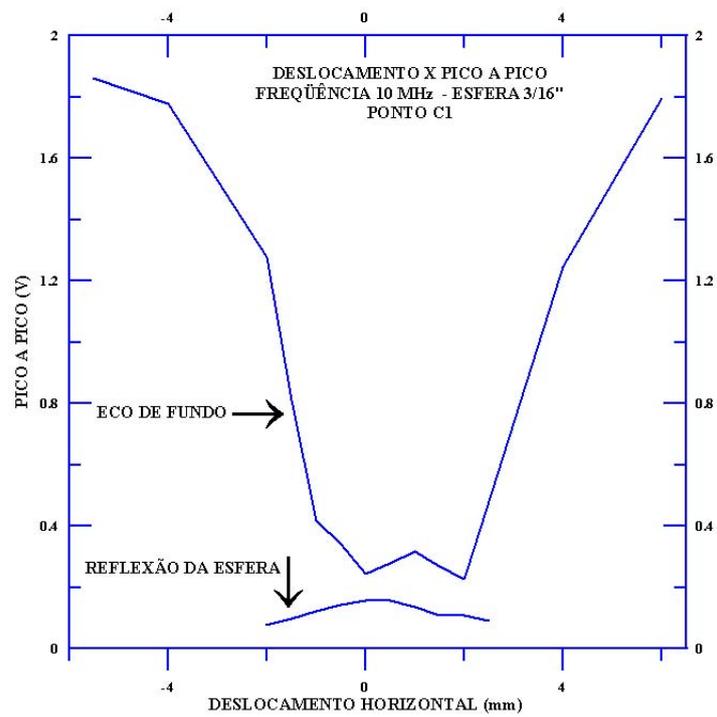


Figura 5: Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através do pico a pico - frequência 10MHz, esfera $\phi 3/16''$.

5. OBSERVAÇÕES FINAIS

Analisando-se as curvas dos gráficos anteriores, utilizando os processamentos de sinais através da área sob a curva e através do pico a pico, verifica-se uma forte semelhança entre elas. As figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, a semelhança entre estas curvas utilizando os transdutores de 10MHz e 5MHz . Observa-se que qualquer um dos processamentos pode ser utilizado nas condições do experimento, indicando, também, boa aplicabilidade na utilização em diversos tipos de padrões de escoamento bifásico.

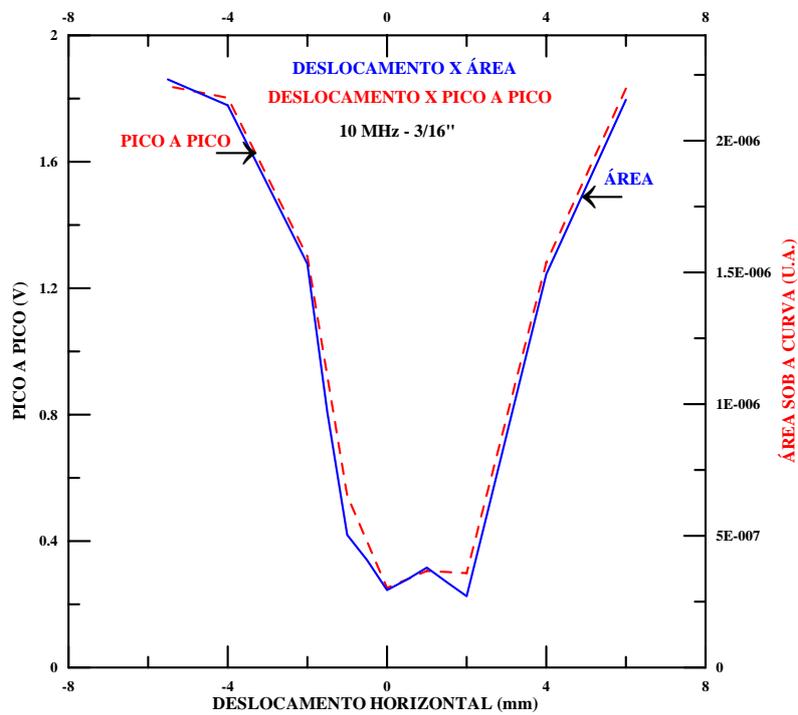


Figura 6: Amplitude do eco de fundo utilizando-se os processamentos de sinais através do pico a pico e da unidade sob área - frequência 10MHz , esfera $\phi 3/16''$.

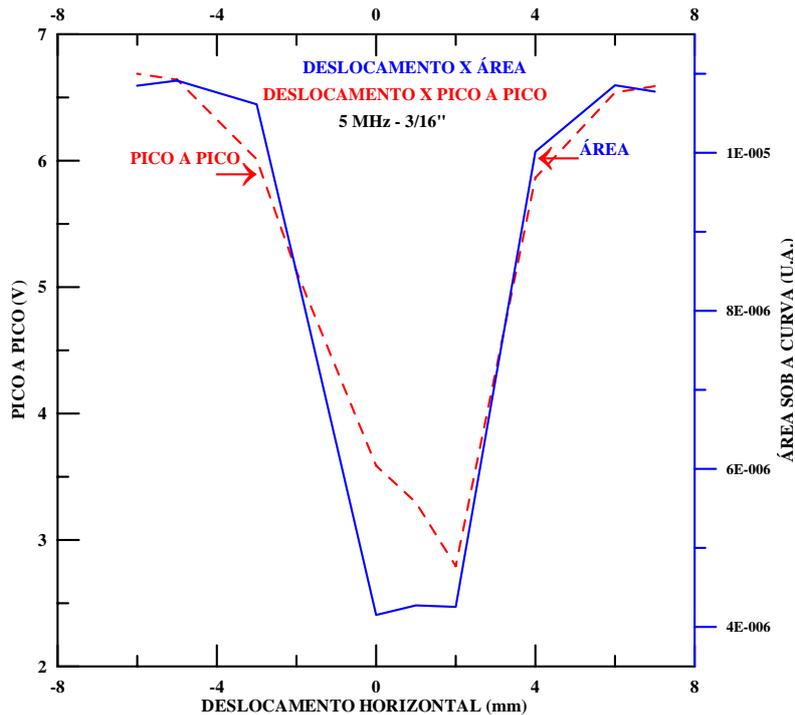


Figura 7: Amplitude do eco de fundo utilizando-se os processamentos de sinais através do pico a pico e da unidade sob área - frequência 5MHz , esfera $\phi 3/16''$.

Deslocamento Vertical da Esfera de Diâmetro $3/16''$ à Partir do Ponto $C1$

Os procedimentos realizados para estudo da interação da esfera com os campos ultra-sônicos gerados pelos transdutores de 5MHz e 10MHz ao deslocar-se verticalmente ao longo do eixo longitudinal do tubo (eixo z) foram os mesmos descritos anteriormente para o deslocamento horizontal.

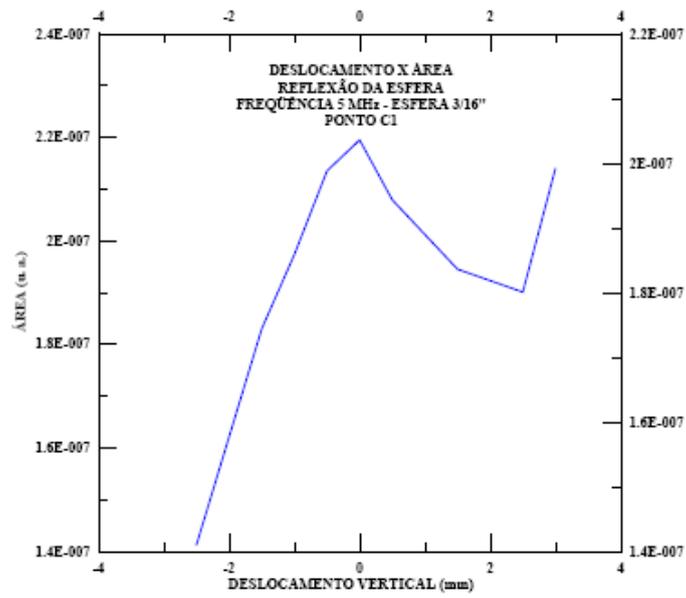
1. TRANSDUTOR 5MHz - PROCESSAMENTO DO SINAL ATRAVÉS DA ÁREA SOB A CURVA

A figura 8(a) mostra os sinais ultra-sônicos refletidos pela esfera quando esta interage com o campo ultra-sônico gerado pelo transdutor de frequência 5MHz . Os valores positivos do deslocamento representam o deslocamento

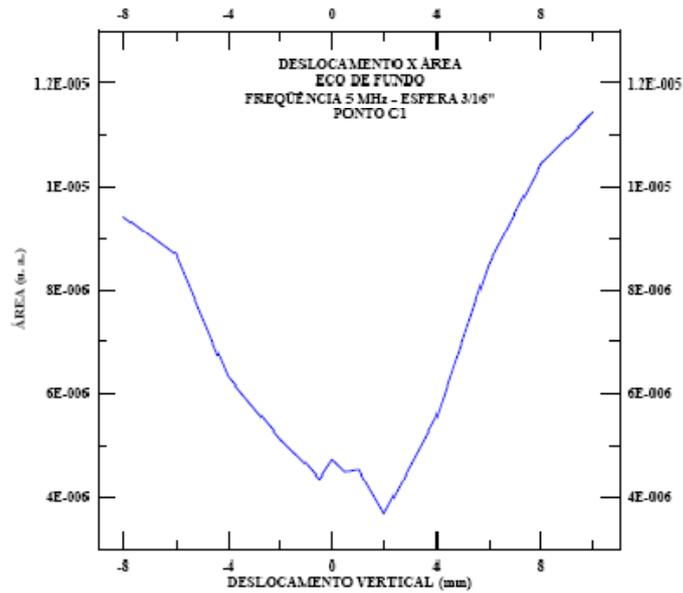
ascendente da esfera e os valores negativos o descendente. O maior valor da área sob a curva ocorre com a esfera na posição $C1$, apresentando, portanto nesta posição, a maior intensidade de reflexão da onda ultra-sônica. Observa-se uma instabilidade dos valores da amplitude de reflexão, expressos através da área sob a curva, à medida que a esfera se deslocou verticalmente para cima e um contínuo decaimento desses valores à medida que a esfera se deslocou verticalmente para baixo. O contínuo e rápido decaimento do sinal está associado ao fio que interligava a esfera ao dispositivo de posicionamento. Durante o deslocamento vertical descendente ocorre uma contínua interação entre o fio e o campo ultra-sônico, que devido seu alinhamento vertical, coincide com o feixe axial do transdutor, que por ser a região de maior energia provoca sensível atenuação do eco.

A figura 8**(b)** se refere às mesmas condições de interação entre a esfera e o campo ultra-sônico descrito anteriormente, porém os sinais analisados são do eco de fundo. Conforme ocorreu no deslocamento horizontal, figura 1**(b)**, verifica-se que à medida que ocorre o deslocamento da esfera o valor da área sob a curva aumenta. Os valores da área sob a curva no deslocamento ascendente foram maiores do que no descendente, pois não ocorreu interação com o fio. Observa-se também pelo gráfico que pequenos deslocamentos verticais da esfera, como de um milímetro, apresentam significativas diferenças entre os sinais captados pelo transdutor, portanto o transdutor é mais sensível ao deslocamento da esfera utilizando a técnica ultra-sônica pelo eco de fundo.

As duas curvas das figuras anteriores também foram plotadas em um único gráfico, para comparação entre as técnicas ultra-sônicas (reflexão da esfera e eco de fundo). Conforme figura 9 observa-se que, conforme ocorreu no deslocamento horizontal, os valores obtidos da área sob a curva utilizando a técnica ultra-sônica pela reflexão da esfera apresenta valores menores que os obtidos utilizando a técnica do eco de fundo. Também conforme observado no deslocamento horizontal, a percepção do transdutor em relação as ondas ultra-sônicas refletidas pela esfera, durante o deslocamento horizontal é bem menor do que a do eco de fundo.



a)



b)

Figura 8: (a) Reflexão da esfera - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$; (b) Eco de fundo - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$.

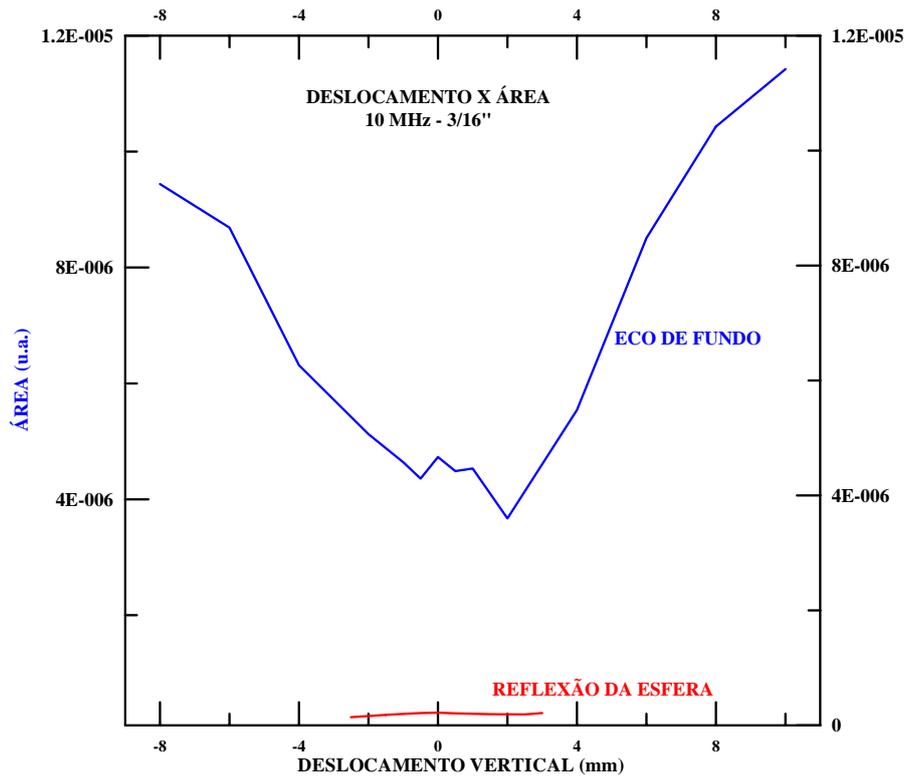


Figura 9: Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através da unidade de área - frequência 5MHz, esfera $\phi 3/16''$

2. TRANSDUTOR 5MHz - PROCESSAMENTO DO SINAL ATRAVÉS DO PICO A PICO

A figura 10 mostra a interação da esfera com o campo ultra-sônico nas mesmas condições descritas anteriormente e utilizando as duas técnicas ultra-sônicas (eco de fundo e reflexão da esfera), porém o processamento do sinal é realizado através do pico a pico. Conforme ocorreu no deslocamento horizontal os sinais obtidos por este processamento geraram curvas semelhantes daquelas obtidas utilizando o processamento do sinal pela área sob a curva. A percepção pelo transdutor dos sinais ultra-sônicos refletidos pela esfera também só é percebida em um curto intervalo de deslocamento da esfera, ao contrário do que ocorre com o eco de fundo.

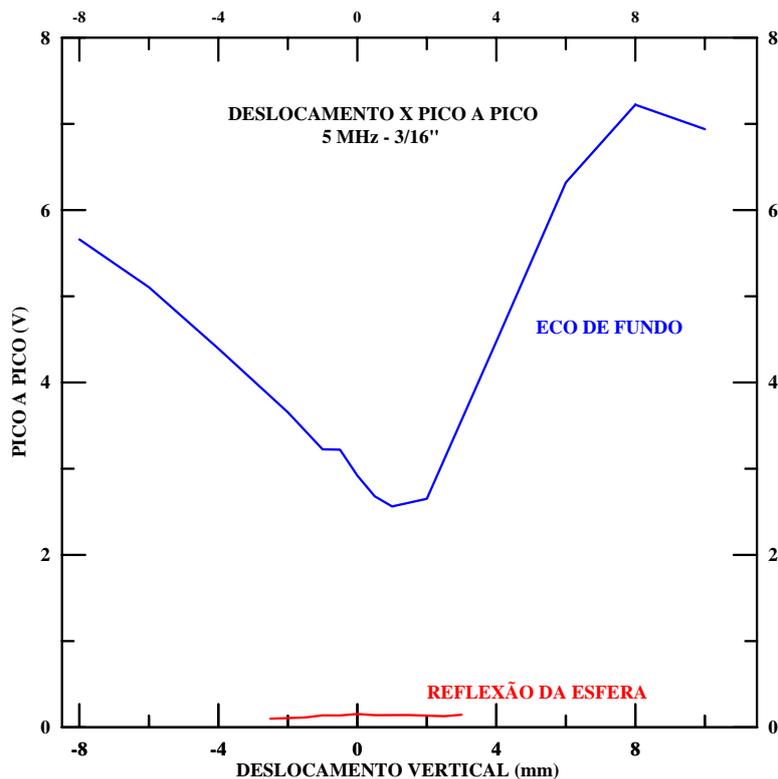


Figura 10: Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através do pico a pico - frequência $5MHz$, esfera $\phi 3/16''$.

3. TRANSDUTOR $10MHz$ - PROCESSAMENTO DO SINAL ATRAVÉS DA ÁREA SOB A CURVA

A figura 11 mostra os valores obtidos pelas técnicas ultra-sônicas eco de fundo e reflexão da esfera decorrentes da interação da esfera com o campo ultra-sônico gerado pelo transdutor de frequência $10MHz$ utilizando o processamento do sinal pela área. Os resultados foram semelhantes aos obtidos com o transdutor de $5MHz$, figura 9.

4. TRANSDUTOR $10MHz$ - PROCESSAMENTO DO SINAL ATRAVÉS DO PICO A PICO

A figura 12 mostra os valores obtidos pelas técnicas ultra-sônicas eco de fundo e reflexão da esfera decorrentes da interação da esfera com o campo ultra-sônico

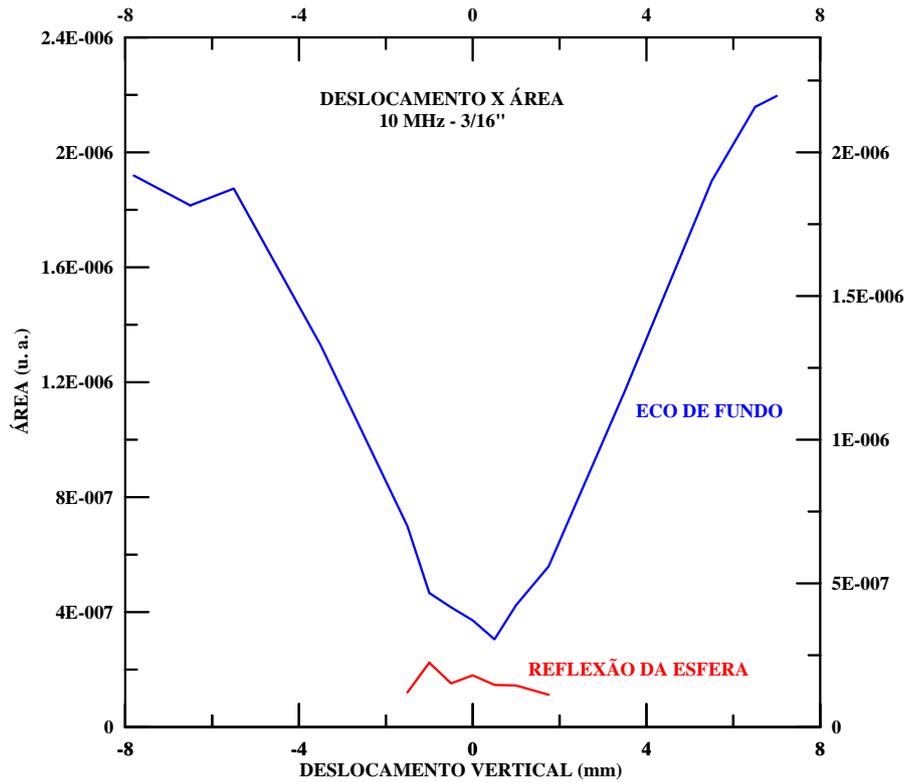


Figura 11: Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através da unidade de área - frequência 10MHz , esfera $\phi 3/16''$

gerado pelo transdutor de frequência 10MHz utilizando o processamento do pico a pico. Os resultados também foram semelhantes aos obtidos com o transdutor de 5MHz , figura 10.

5. OBSERVAÇÕES FINAIS

As observações em relação a interação da esfera com os campos ultra-sônicos são as mesmas descritas em relação ao deslocamento horizontal, isto é, forte semelhança entre os processamentos de sinais utilizados (pico a pico e área sob a curva).

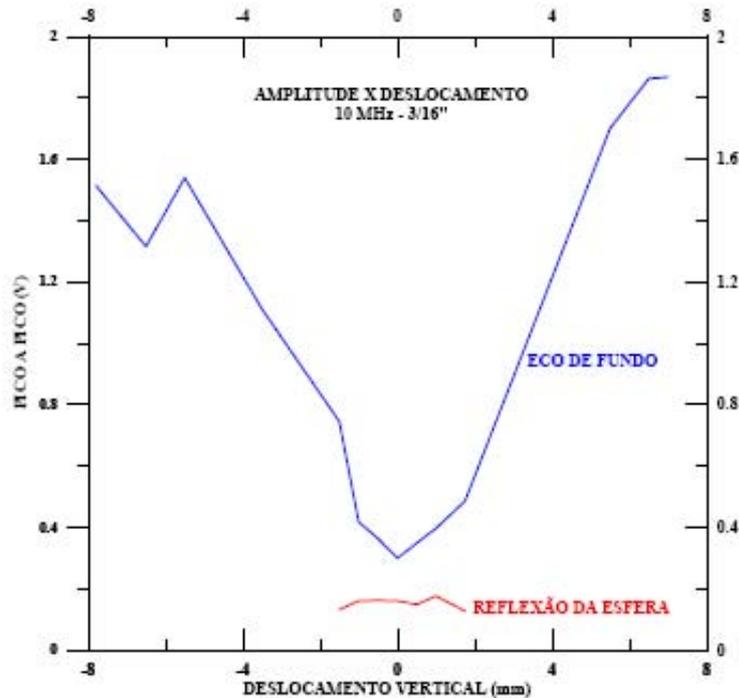


Figura 12: Valores da intensidade do eco de fundo e reflexão da esfera, utilizando-se o processamento do sinal através do pico a pico - frequência 10MHz , esfera $\phi 3/16''$

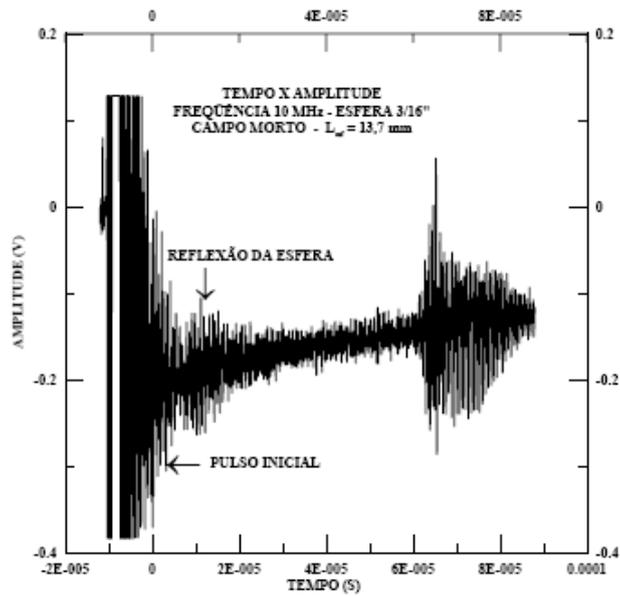
Resultados do Campo Morto Gerado Gerado pelos Transdutores de 5MHz e 10MHz com a Esfera de Diâmetro $3/16''$

As esferas foram posicionadas no centro do tubo e deslocadas no sentido do transdutor segundo a direção do eixo y , de maneira a observar a percepção da esfera pelo transdutor. O transdutor gera um pulso inicial que no osciloscópio corresponde à parte do interior da tubulação próxima ao transdutor. Bolhas que estejam nesta região tornam-se imperceptíveis pois os pulsos ultra-sônicos refletidos por ela ficam embutidos no pulso inicial que apresenta alta amplitude. Essa região é denominada campo morto.

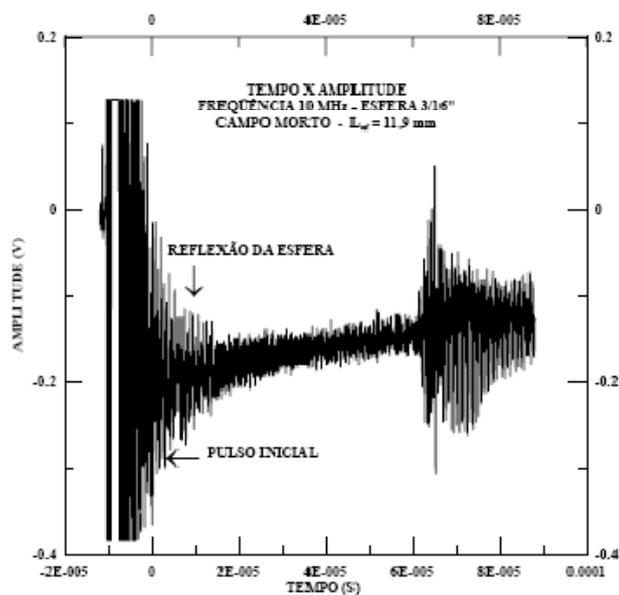
As figuras 13(a) e 13(b) mostram a reflexão do sinal ultra-sônico refletido pela esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada respectivamente a $13,7\text{mm}$ e $11,9\text{mm}$

da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de $10MHz$. Observa-se que a $13,7mm$ de distância da parede interna não ocorre interação entre o pulso ultra-sônico refletido pela esfera e o pulso inicial, mas a partir de $11,9mm$ começa a ocorrer a interação, tornando imperceptível a localização da esfera quando mais se aproxima da parede interna do tubo.

As figuras 14(a) e (b) mostram a reflexão do sinal ultra-sônico refletido pela esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada respectivamente a $13,7mm$ e $11,9mm$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de $5MHz$. A interação entre o pulso ultra-sônico refletido pela esfera e o pulso inicial apresenta praticamente o mesmo comportamento que ocorreu utilizando-se o transdutor de $10MHz$.

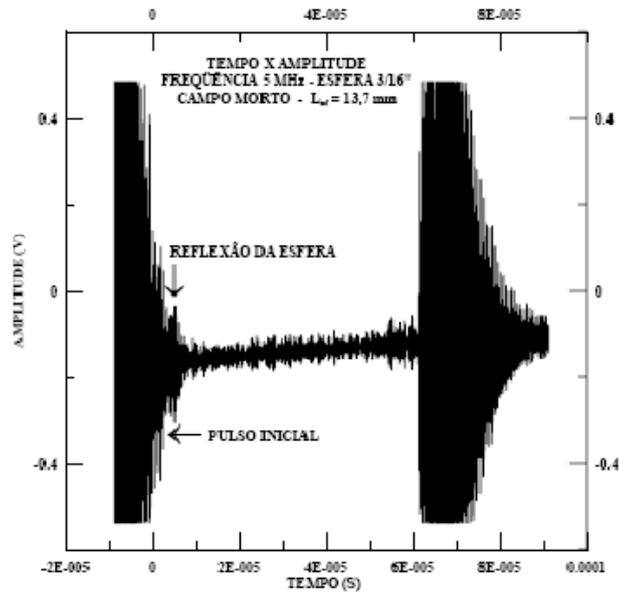


a)

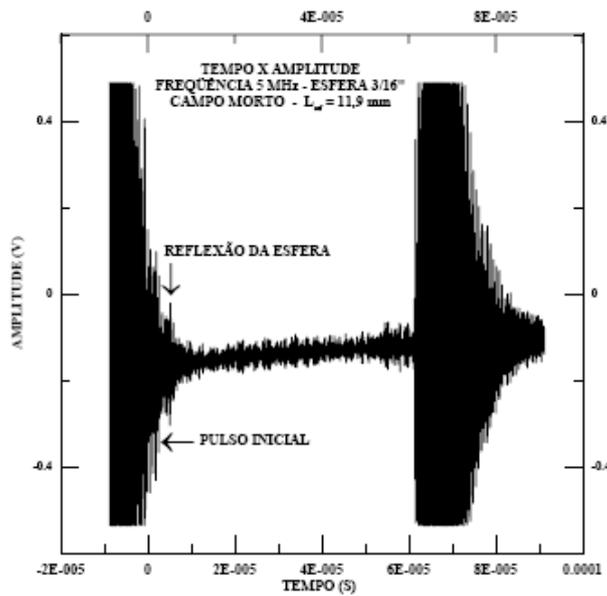


b)

Figura 13: **(a)** Campo morto - Esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada a $13,7\text{mm}$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de 10MHz ; **(b)** Campo morto - Esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada a $11,9\text{mm}$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de 10MHz .



a)



b)

Figura 14: (a) Campo morto - Esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada a $13,7\text{mm}$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de 5MHz ; (b) Campo morto - Esfera de diâmetro $\phi 3/16''$ posicionada a $11,9\text{mm}$ da parede interna do tubo onde se localiza o transdutor de 10MHz .

Apêndice III

Fabricação e Montagem da Seção de Testes

A implantação da planta da seção de testes para padrões de escoamento horizontal e inclinado foi desenvolvida em três etapas: projeto, fabricação e montagem.

Inicialmente foram definidos o diâmetro interno do tubo, $25,6 \text{ mm}$, ângulos de inclinação, -10° a $+10^\circ$, e comprimento total da tubulação que foi definido em função do local disponível dentro do laboratório para instalação da seção, área disponível de $0,95 \text{ m} \times 10,0 \text{ m}$, chegando-se a um comprimento (aço mais acrílico) de $7,8 \text{ m}$. Com essas informações foram feitos desenhos de conjunto e de detalhes dos componentes, para especificação dos materiais e levantamento das quantidades dos mesmos. Optou-se por uma estrutura pesada para maior rigidez da seção de testes, evitando-se que possíveis vibrações viessem a influenciar no desenvolvimento do escoamento. Foram comprados tubos quadrados, $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, com espessura de parede de $3,0 \text{ mm}$, sendo utilizados para fabricação do cavalete e como base de apoio dos dispositivos de regulação e da tubulação. Os dispositivos para posicionamento dos ângulos foram também fabricados com estrutura de tubo quadrado e cobertos com chapa de espessura de $4,76 \text{ mm}$ onde foram feitas as marcações e furações para definição dos ângulos de inclinação da seção. Esta base foi formada por dois tubos quadrados soldados lado a lado. A figura 15 mostra detalhes de parte da estrutura ainda no chão.

Como o laboratório dispunha de pouco espaço, o local disponível para instalação se localizava entre a seção de testes horizontal de $2''$ e uma das paredes do

laboratório, dispondo-se de um comprimento de m e m de largura. Em razão do pouco espaço e do peso da estrutura, foram realizadas pré-montagens a frente do circuito de água antes da transferência para o local definitivo pois o posicionamento dos componentes estruturais da seção precisavam ser posicionados com precisão para que pudesse se trabalhar dentro da faixa de ângulos almejada. A figura 16 mostra uma das pré-montagem da estrutura.

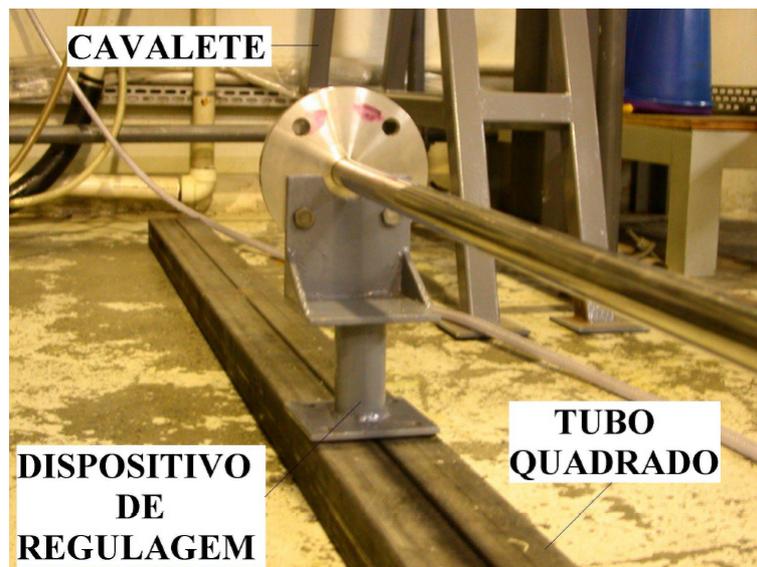


Figura 15: Detalhe de componentes da seção de testes posicionada no chão.

Inicialmente o cavalete e os dois dispositivos para posicionamento dos ângulos foram transportados, posicionados e fixados ao chão. Os dispositivos para posicionamento dos ângulos além da fixação no chão também foram fixados a parede, através de cantoneira, devido sua altura, $2,85 m$, que provocava oscilação na parte mais alta. Antes da fixação foi realizado alinhamento dos mesmos e verificação dos máximos ângulos possíveis de serem obtidos. Em seguida foi realizada a montagem da barra de aço inoxidável nos mancais e depois a montagem dos mesmos no cavalete. A etapa seguinte da montagem foi a fixação dos tubos quadrados, utilizados como base de apoio dos dispositivos de regulagem e da tubulação, através do processo de soldagem que por vezes causa problemas de empenamento. A figura 17 mostra a seção de testes inclinada já montada.

Uma das etapas que demandou muito tempo e necessitou de grande precisão



Figura 16: Detalhe da pré-montagem de parte da seção de testes localizada a frente do circuito de água.

durante sua execução foi a furação das chapas pertencentes aos dispositivos para posicionamento dos ângulos. Para cada ângulo foram feitos dois furos em cada chapa, sendo os mesmos definidos através de medidas de distância e de relações trigonométricas. O ajuste fino dos ângulos (horizontal e inclinado) era realizado por meio de parafusos localizados nos dispositivos de regulagem, utilizando-se um medidor de inclinação com resolução de $0,1^\circ$ que era posicionado em alguns pontos ao longo dos tubos de aço inoxidável e de acrílico.

A conexão entre o tubo de acrílico e o de aço inoxidável foi realizada através de flange em PVC, projetado de maneira que não ocorresse vazamento no acoplamento tubo de acrílico-flange e que não provocasse tensões excessivas sobre o tubo de acrílico. A figura 18 mostra o tubo de acrílico montado na seção de testes com o medidor de inclinação posicionado no local onde foram obtidas imagens do escoamento. A figura 19 mostra o medidor de inclinação na mesma posição com a seção de testes inclinada a $+5^\circ$.

Para aplicação do sistema de visualização de imagens foi necessário posicionar a câmera digital de maneira que a mesma pudesse acompanhar as variações dos

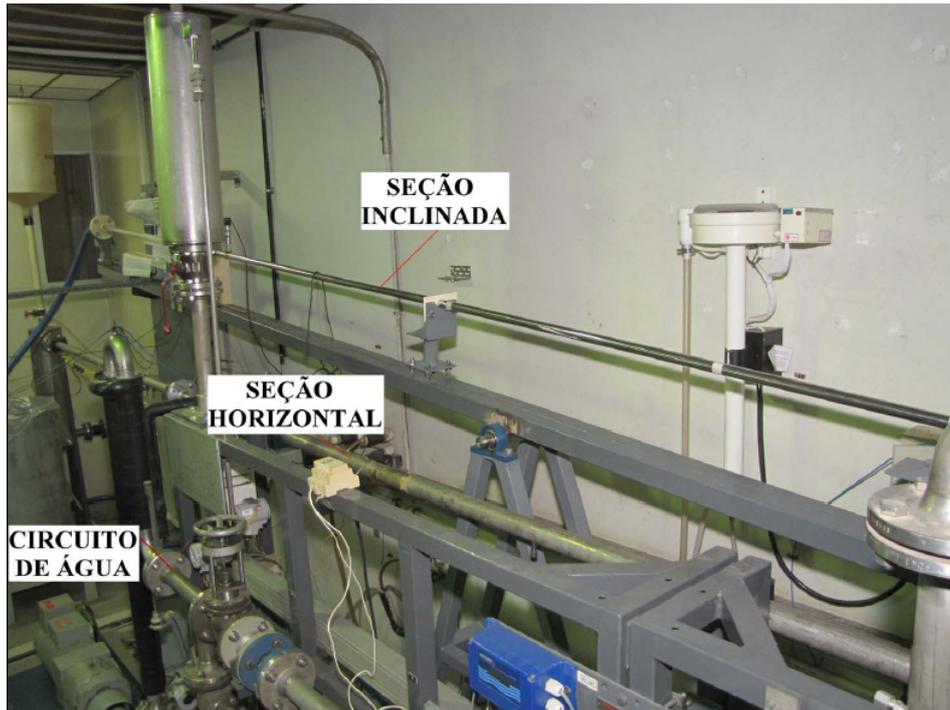


Figura 17: Seção de testes inclinada de 1° montada ao lado da seção horizontal de 2°.

ângulos de inclinação. Para isso foi feito um suporte em que a distância entre o a região do tubo de acrílico, onde foram registradas as imagens, e a posição da câmera fosse mantida constante independente do ângulo de inclinação. O suporte era formado por duas cantoneiras, utilizada para suporte de eletrodutos, unidas por parafusos e fixada ao tubo quadrado da seção de testes também por parafusos. Foi fabricada uma peça em PVC que foi conectada a ponta do suporte, permitindo a fixação e ajuste da câmera digital. A figura 20 mostra a câmera digital presa ao suporte através da peça fabricada em PVC.

O sistema ultra-sônico de alta velocidade trabalha com quatro transdutores do modo pulso-eco, tipo monocristal da Panametrics, modelo A111S, diâmetro 12,7mm (1/2") e frequência de 10 MHz, sendo dois posicionados na parte inferior do tubo de acrílico e dois na parte superior, na região do tubo de acrílico um pouco antes de onde foram registradas as imagens pela câmera digital. A figura 21 mostra os quatro transdutores ultra-sônicos posicionados no tubo de acrílico.

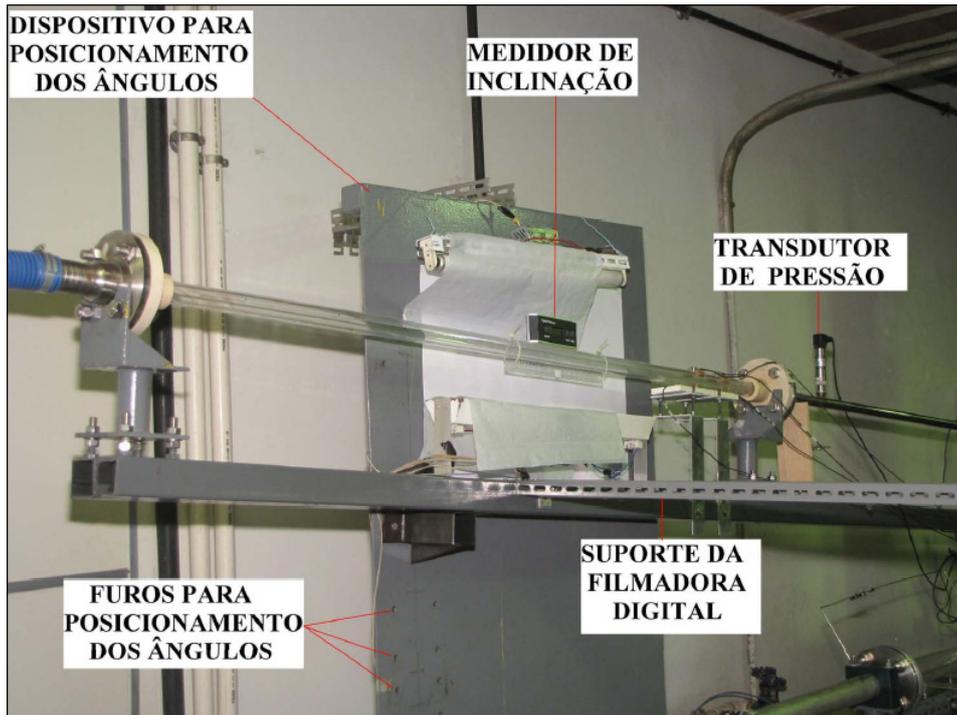


Figura 18: Tubo de acrílico e outros componentes da seção inclinada.



Figura 19: Medidor de inclinação com a seção de testes inclinada a $+5^\circ$.



Figura 20: Câmera digital fixa na ponta do suporte.

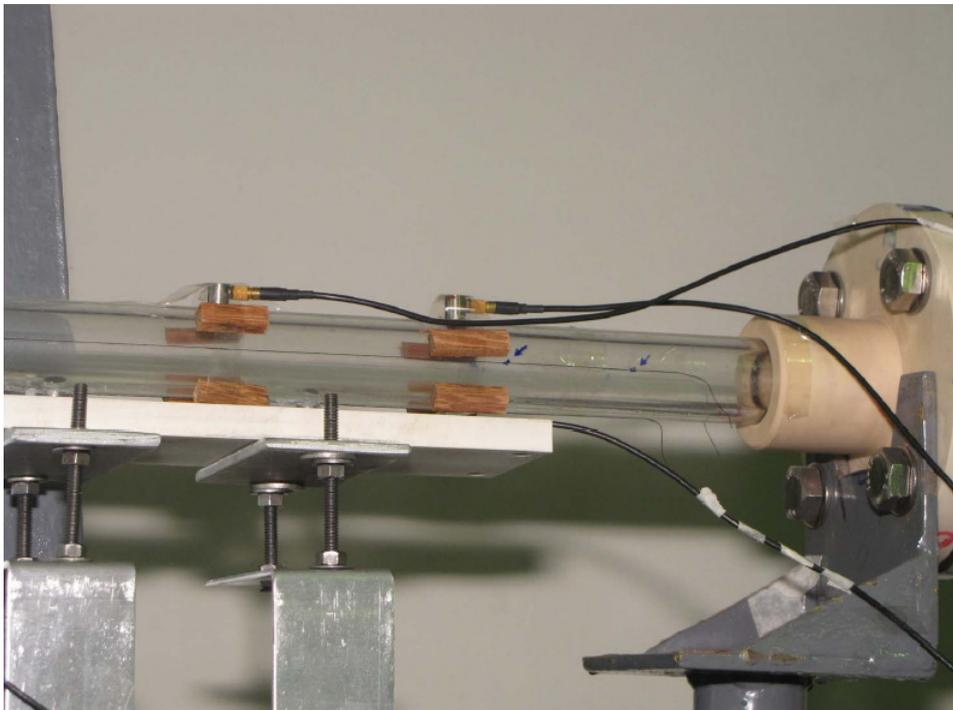


Figura 21: Transdutores ultra-sônicos instalados no tubo de acrílico.

Apêndice IV

Tabelas de Parâmetros Bifásicos

Neste apêndice são apresentados através de tabelas os valores dos parâmetros bifásicos medidos pelas técnicas ultra-sônica e de visualização.

Escoamento Horizontal, $\beta=0^\circ$

Nas tabelas 2 e 3 são apresentados os valores medidos dos componentes das velocidades das bolhas alongadas obtidos respectivamente pelas técnicas ultra-sônica e de visualização. São apresentadas as velocidades médias do nariz da bolha alongada V_{NB} , da sua cauda V_{CB} , e a média das médias V_{MB} , obtidas respectivamente pelas equações 5.1, 5.2 e 5.3. N = Número de amostras tratadas e Δ é o desvio padrão. Nesta tabela são apresentados valores médios para um número de amostras em torno de dez.

Nas tabelas 4 e 5 são apresentados os valores medidos com respectivos desvios padrões dos componentes das velocidades dos pistões de líquido obtidos respectivamente pelas técnicas ultra-sônica e por visualização. São apresentadas as velocidades médias da frente do pistão de líquido (V_{FPL}), da parte posterior (V_{PPL}), e a média das médias (V_{MPL}) obtidas respectivamente pelas equações 5.4, 5.5 e 5.6. N é o número de amostras tratadas e Δ o desvio padrão. Nesta tabela são apresentados valores médios para um número de amostras em torno de dez.

Tabela 2: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais</i> (m/s)	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	V_{CB} (m/s)	ΔV_{CB} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,79$	0,84	0,09	0,73	0,15	0,78	0,09	9
$U_{GS} = 1,59$	1,17	0,30	1,25	0,24	1,21	0,17	9
$U_{GS} = 2,07$	1,48	0,18	1,75	0,37	1,62	0,25	6
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,79$	1,16	0,20	1,02	0,21	1,09	0,14	86
$U_{GS} = 1,59$	1,62	0,30	1,78	0,41	1,70	0,24	32
$U_{GS} = 2,07$	1,80	0,23	1,97	0,62	1,89	0,34	73
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,77$	2,05	0,31	1,96	0,18	2,00	0,13	10
$U_{GS} = 1,55$	2,57	0,54	2,44	0,57	2,51	0,31	12
$U_{GS} = 2,01$	2,85	0,42	3,02	0,49	2,94	0,33	10

As tabelas 6 e 7 apresentam os comprimentos médios das bolhas alongadas (L_B) e dos pistões de líquido (L_{PL}), com os respectivos desvios padrões (Δ), calculados a partir dos valores medidos das velocidades da bolha alongada (V_{MB}) e do pistão de líquido.

Tabela 3: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	V_{CB} (m/s)	ΔV_{CB} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,79$	0,81	0,05	0,84	0,08	0,83	0,06	5
$U_{GS} = 1,59$	1,25	0,10	1,27	0,11	1,26	0,04	6
$U_{GS} = 2,07$	1,58	0,12	1,56	0,11	1,57	0,10	5
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,79$	1,10	0,06	1,18	0,10	1,14	0,07	10
$U_{GS} = 1,59$	1,56	0,09	1,60	0,14	1,58	0,10	10
$U_{GS} = 2,07$	1,88	0,12	1,97	0,09	1,93	0,06	6
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,77$	2,05	0,06	2,05	0,16	2,05	0,10	10
$U_{GS} = 1,55$	2,49	0,08	2,53	0,23	2,51	0,12	11
$U_{GS} = 2,01$	2,91	0,15	2,97	0,25	2,94	0,16	10

Tabela 4: Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{FPL} (m/s)	ΔV_{FPL} (m/s)	V_{PPL} (m/s)	ΔV_{PPL} (m/s)	V_{MPL} (m/s)	ΔV_{MPL} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
<i>$U_{LS} = 0,22$</i>							
$U_{GS} = 0,79$	0,78	0,07	0,84	0,09	0,81	0,03	10
$U_{GS} = 1,59$	1,29	0,12	1,14	0,28	1,21	0,15	10
$U_{GS} = 2,07$	1,84	0,31	1,71	0,31	1,78	0,19	8
<i>$U_{LS} = 0,49$</i>							
$U_{GS} = 0,79$	1,05	0,17	1,16	0,11	1,10	0,09	9
$U_{GS} = 1,59$	1,79	0,47	1,56	0,36	1,67	0,35	9
$U_{GS} = 2,07$	2,01	0,49	1,82	0,15	1,92	0,25	11
<i>$U_{LS} = 1,08$</i>							
$U_{GS} = 0,77$	1,73	0,16	1,89	0,30	1,81	0,21	9
$U_{GS} = 1,55$	2,50	0,67	2,39	0,61	2,45	0,40	7
$U_{GS} = 2,01$	3,01	0,46	2,82	0,48	2,92	0,31	10

Tabela 5: Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica de visualização no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{FPL} (m/s)	ΔV_{FPL} (m/s)	V_{PPL} (m/s)	ΔV_{PPL} (m/s)	V_{MPL} (m/s)	ΔV_{MPL} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,79$	1,01	0,23	0,86	0,01	0,86	0,11	8
$U_{GS} = 1,59$	1,26	0,10	1,27	0,08	1,27	0,07	8
$U_{GS} = 2,07$	1,56	0,11	1,57	0,13	1,78	0,19	8
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,79$	1,15	0,12	1,10	0,05	1,12	0,06	10
$U_{GS} = 1,59$	1,57	0,17	1,56	0,09	1,57	0,09	10
$U_{GS} = 2,07$	2,03	0,16	1,91	0,10	1,97	0,07	10
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,77$	2,07	0,18	2,05	0,06	2,06	0,11	12
$U_{GS} = 1,55$	2,53	0,23	2,49	0,08	2,51	0,10	10
$U_{GS} = 2,10$	2,97	0,24	2,93	0,15	2,95	0,13	10

Tabela 6: Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N	L_{PL} (m)	ΔL_{PL} (m)	N
ULTRA-SOM						
$U_{LS} = 0,22$						
$U_{GS} = 0,79$	1,62	0,32	10	0,51	0,13	60
$U_{GS} = 1,59$	2,5	0,85	10	0,50	0,27	10
$U_{GS} = 2,07$	3,22	0,88	10	0,33	0,15	10
$U_{LS} = 0,49$						
$U_{GS} = 0,79$	0,48	0,18	10	0,36	0,12	10
$U_{GS} = 1,59$	0,57	0,30	9	0,34	0,17	9
$U_{GS} = 2,07$	1,37	0,66	11	0,40	0,12	11
$U_{LS} = 1,08$						
$U_{GS} = 0,77$	0,15	0,04	9	0,10	0,07	9
$U_{GS} = 1,55$	0,31	0,09	7	0,16	0,03	7
$U_{GS} = 2,01$	0,56	0,20	10	0,26	0,11	10

Tabela 7: Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica de visualização no escoamento horizontal.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N	L_{PL} (m)	ΔL_{PL} (m)	N
VISUALIZAÇÃO						
$U_{LS} = 0,22$						
$U_{GS} = 0,79$	1,10	0,31	8	0,31	0,24	8
$U_{GS} = 1,59$	1,70	0,39	8	0,24	0,13	8
$U_{GS} = 2,07$	2,70	1,04	8	0,15	0,08	8
$U_{LS} = 0,49$						
$U_{GS} = 0,79$	0,47	0,11	9	0,26	0,08	9
$U_{GS} = 1,59$	0,78	0,27	10	0,30	0,16	10
$U_{GS} = 2,07$	1,00	0,48	7	0,29	0,09	7
$U_{LS} = 1,08$						
$U_{GS} = 0,77$	0,14	0,04	25	0,18	0,09	25
$U_{GS} = 1,50$	0,25	0,11	10	0,17	0,10	10
$U_{GS} = 1,93$	0,36	0,15	18	0,25	0,12	18

Escoamento Inclinado, $\beta=5^\circ$

As tabelas 8 e 9 apresentam valores médios das velocidades e respectivos desvios padrões das bolhas alongadas para diferentes pares de velocidades superficiais gás-líquido obtidos respectivamente pelas técnicas ultra-sônica e por visualização.

As tabelas 10 e 11 apresentam valores das velocidades e desvios padrões de componetes dos pistões de líquido em diferentes pares de velocidades superficiais medidas pelas técnicas ultra-sônicas e por visualização. São apresentadas as velocidades médias da frente do pistão de líquido (V_{FPL}), da parte posterior (V_{PPL}), a média do pistão de líquido (V_{MPL}) e os respectivos desvios padrões.

As tabelas 12 e 13 apresentam os comprimentos médios das bolhas alongadas (L_B) e dos pistões de líquido (L_{PL}), com os respectivos desvios padrões (Δ), medidos pela técnica ultra-sônica e por visualização.

Tabela 8: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica utlra-sônica - Escoamento $+5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	V_{CB} (m/s)	ΔV_{CB} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,79$	0,81	0,09	0,80	0,09	0,81	0,06	60
$U_{GS} = 1,59$	1,26	0,14	1,34	0,21	1,30	0,11	51
$U_{GS} = 2,02$	1,60	0,31	1,67	0,44	1,63	0,27	52
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,79$	1,16	0,20	1,02	0,21	1,09	0,14	86
$U_{GS} = 1,50$	1,62	0,30	1,78	0,41	1,70	0,24	32
$U_{GS} = 2,02$	1,80	0,23	1,97	0,62	1,89	0,34	73
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,77$	1,99	0,20	2,02	0,19	2,01	0,15	99
$U_{GS} = 1,50$	2,49	0,27	2,56	0,48	2,53	0,29	70
$U_{GS} = 1,93$	2,77	0,48	2,67	0,60	2,72	0,40	92

Tabela 9: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização- Escoamento $+5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	V_{CB} (m/s)	ΔV_{CB} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,79$	0,89	0,04	0,89	0,06	0,89	0,04	76
$U_{GS} = 1,59$	1,32	0,08	1,36	0,12	1,34	0,07	116
$U_{GS} = 2,02$	1,58	0,11	1,58	0,13	1,58	0,09	89
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,79$	1,21	0,04	1,22	0,06	1,22	0,04	64
$U_{GS} = 1,50$	1,60	0,07	1,63	0,07	1,61	0,05	136
$U_{GS} = 2,02$	1,98	0,10	2,03	0,13	2,01	0,08	84
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,77$	2,18	0,06	2,16	0,06	2,17	0,05	82
$U_{GS} = 1,50$	2,73	0,07	2,69	0,11	2,71	0,07	89
$U_{GS} = 1,93$	3,04	0,09	3,02	0,16	3,03	0,10	66

Tabela 10: Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento +5°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{FPL} (m/s)	ΔV_{FPL} (m/s)	V_{PPL} (m/s)	ΔV_{PPL} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,79$	0,79	0,09	0,81	0,09	0,80	0,06	60
$U_{GS} = 1,59$	1,38	0,24	1,26	0,14	1,32	0,16	52
$U_{GS} = 2,02$	1,62	0,44	1,59	0,30	1,61	0,31	53
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,79$	0,95	0,20	1,06	0,19	1,01	0,14	86
$U_{GS} = 1,50$	2,11	0,98	1,62	0,29	1,87	0,52	47
$U_{GS} = 2,02$	1,88	0,60	1,65	0,21	1,77	0,33	74
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,77$	1,85	0,17	1,82	0,18	1,84	0,13	99
$U_{GS} = 1,50$	2,41	0,54	2,30	0,29	2,36	0,31	80
$U_{GS} = 1,93$	2,48	0,66	2,55	0,38	2,51	0,40	95

Tabela 11: Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +5°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{FPL} (m/s)	ΔV_{FPL} (m/s)	V_{PPL} (m/s)	ΔV_{PPL} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,79$	0,88	0,07	0,89	0,05	0,88	0,04	103
$U_{GS} = 1,59$	1,36	0,12	1,32	0,08	1,34	0,07	136
$U_{GS} = 2,02$	1,59	0,13	1,58	0,13	1,58	0,09	98
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,79$	1,23	0,06	1,21	0,03	1,22	0,04	62
$U_{GS} = 1,50$	1,63	0,07	1,60	0,07	1,61	0,06	137
$U_{GS} = 2,02$	2,02	0,13	1,98	0,10	2,00	0,08	85
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,77$	2,16	0,06	2,18	0,06	2,17	0,05	81
$U_{GS} = 1,50$	2,69	0,11	2,73	0,07	2,71	0,06	87
$U_{GS} = 1,93$	3,03	0,18	3,04	0,09	3,03	0,11	66

Tabela 12: Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica - Escoamento $+5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N	L_{PL} (m)	ΔL_{PL} (m)	N
ULTRA-SOM						
$U_{LS} = 0,22$						
$U_{GS} = 0,79$	0,79	0,25	60	0,36	0,17	60
$U_{GS} = 1,59$	1,75	0,63	51	0,38	0,17	52
$U_{GS} = 2,02$	2,21	0,83	52	0,39	0,18	53
$U_{LS} = 0,49$						
$U_{GS} = 0,79$	0,36	0,13	85	0,27	0,12	86
$U_{GS} = 1,50$	1,04	0,45	43	0,38	0,27	48
$U_{GS} = 2,02$	1,36	0,52	73	0,30	0,13	74
$U_{LS} = 1,08$						
$U_{GS} = 0,77$	0,12	0,05	99	0,13	0,06	99
$U_{GS} = 1,50$	0,33	0,19	70	0,21	0,13	80
$U_{GS} = 1,93$	0,51	0,26	92	0,16	0,09	96

Tabela 13: Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica de visualização - Escoamento $+5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N	L_{PL} (m)	ΔL_{PL} (m)	N
VISUALIZAÇÃO						
$U_{LS} = 0,22$						
$U_{GS} = 0,79$	0,79	0,26	69	0,38	0,18	99
$U_{GS} = 1,59$	1,50	0,57	101	0,34	0,14	116
$U_{GS} = 2,02$	2,10	0,90	87	0,37	0,15	97
$U_{LS} = 0,49$						
$U_{GS} = 0,79$	0,38	0,15	63	0,29	0,15	61
$U_{GS} = 1,50$	0,76	0,31	130	0,30	0,14	137
$U_{GS} = 2,02$	1,25	0,42	79	0,39	0,17	85
$U_{LS} = 1,08$						
$U_{GS} = 0,77$	0,12	0,05	81	0,16	0,07	80
$U_{GS} = 1,50$	0,30	0,15	89	0,25	0,13	86
$U_{GS} = 1,93$	0,40	0,16	66	0,30	0,13	66

Tabela 14: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento +10°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	V_{CB} (m/s)	ΔV_{CB} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,78$	0,81	0,06	0,84	0,05	0,83	0,04	18
$U_{GS} = 1,52$	1,40	0,29	1,32	0,22	1,36	0,22	10
$U_{GS} = 1,98$	1,63	0,28	1,44	0,20	1,54	0,23	10
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,77$	1,04	0,11	1,04	0,09	1,04	0,09	24
$U_{GS} = 1,57$	1,49	0,13	1,67	0,42	1,58	0,22	10
$U_{GS} = 2,00$	1,96	0,56	1,80	0,40	1,88	0,40	13
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,76$	1,99	0,13	2,06	0,26	2,03	0,18	20
$U_{GS} = 1,52$	2,34	0,37	2,49	0,29	2,42	0,20	10
$U_{GS} = 1,94$	2,83	0,69	2,56	0,60	2,70	0,23	9

Escoamento Inclinado, $\beta=10^\circ$

As tabelas 14 e 15 apresentam valores médios das velocidades e respectivos desvios padrões das bolhas alongadas para diferentes pares de velocidades superficiais gás-líquido obtidos respectivamente pelas técnicas ultra-sônica e por visualização.

As tabelas 16 e 17 apresentam valores das velocidades e desvios padrões de componetes dos pistões de líquido em diferentes pares de velocidades superficiais medidas pelas técnicas ultra-sônicas e por visualização. São apresentadas as velocidades médias da frente do pistão de líquido (V_{FPL}), da parte posterior (V_{PPL}), a média do pistão de líquido (V_{MPL}) e os respectivos desvios padrões (Δ).

As tabelas 18 e 19 apresentam os comprimentos médios das bolhas alongadas (L_B) e dos pistões de líquido (L_{PL}), com os respectivos desvios padrões (Δ), medidos pela técnica ultra-sônica e de visualização.

Tabela 15: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +10°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	V_{CB} (m/s)	ΔV_{CB} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,78$	0,91	0,04	0,89	0,06	0,90	0,03	15
$U_{GS} = 1,52$	1,32	0,08	1,42	0,11	1,37	0,06	14
$U_{GS} = 1,98$	1,61	0,09	1,66	0,14	1,63	0,09	14
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,77$	1,13	0,04	1,18	0,06	1,16	0,04	11
$U_{GS} = 1,57$	1,61	0,06	1,61	0,06	1,61	0,06	10
$U_{GS} = 2,00$	1,93	0,11	1,96	0,09	1,94	0,07	12
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,76$	2,17	0,07	2,19	0,12	2,18	0,08	16
$U_{GS} = 1,52$	2,63	0,07	2,63	0,20	2,63	0,10	12
$U_{GS} = 1,94$	3,10	0,03	3,15	0,18	3,12	0,09	10

Tabela 16: Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento +10°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{FPL} (m/s)	ΔV_{FPL} (m/s)	V_{PPL} (m/s)	ΔV_{PPL} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,78$	0,82	0,10	0,80	0,06	0,81	0,07	22
$U_{GS} = 1,52$	1,19	0,18	1,40	0,29	1,29	0,19	10
$U_{GS} = 1,98$	1,48	0,24	1,63	0,27	1,56	0,18	10
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,77$	1,04	0,09	1,05	0,10	1,04	0,06	24
$U_{GS} = 1,57$	1,61	0,45	1,49	0,13	1,55	0,28	10
$U_{GS} = 2,00$	1,72	0,37	1,74	0,51	1,30	0,59	12
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,76$	2,04	0,23	1,99	0,13	2,01	0,13	20
$U_{GS} = 1,52$	2,41	0,31	2,39	0,41	2,40	0,22	10
$U_{GS} = 1,94$	2,38	0,66	3,00	0,75	2,69	0,60	10

Tabela 17: Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica de visualização - Escoamento +10°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{FPL} (m/s)	ΔV_{FPL} (m/s)	V_{PPL} (m/s)	ΔV_{PPL} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
VISUALIZAÇÃO							
$U_{LS} = 0,22$							
$U_{GS} = 0,78$	0,90	0,06	0,91	0,04	0,90	0,03	16
$U_{GS} = 1,52$	1,39	0,12	1,33	0,09	1,36	0,08	15
$U_{GS} = 1,98$	1,64	0,18	1,61	0,08	1,63	0,10	13
$U_{LS} = 0,49$							
$U_{GS} = 0,77$	1,26	0,07	1,21	0,05	1,24	0,05	12
$U_{GS} = 1,57$	1,61	0,06	1,61	0,06	1,61	0,05	12
$U_{GS} = 2,00$	1,96	0,09	1,94	0,10	1,95	0,07	12
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,76$	2,19	0,12	2,17	0,07	2,18	0,07	15
$U_{GS} = 1,52$	2,63	0,07	2,63	0,20	2,63	0,10	12
$U_{GS} = 1,94$	3,15	0,18	3,08	0,04	3,12	0,09	10

Tabela 18: Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica - Escoamento $+10^\circ$

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N	L_{PL} (m)	ΔL_{PL} (m)	N
ULTRA-SOM						
$U_{LS} = 0,22$						
$U_{GS} = 0,78$	0,65	0,13	18	0,38	0,17	22
$U_{GS} = 1,52$	1,45	0,33	8	0,33	0,15	10
$U_{GS} = 1,98$	1,64	0,65	10	0,30	0,07	10
$U_{LS} = 0,49$						
$U_{GS} = 0,77$	0,31	0,11	24	0,30	0,08	24
$U_{GS} = 1,57$	0,89	0,30	10	0,29	0,12	10
$U_{GS} = 2,00$	1,15	0,51	12	0,35	0,16	12
$U_{LS} = 1,08$						
$U_{GS} = 0,76$	0,11	0,05	20	0,12	0,05	20
$U_{GS} = 1,52$	0,29	0,19	10	0,16	0,09	10
$U_{GS} = 1,94$	0,44	0,16	9	0,27	0,13	10

Tabela 19: Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica de visualização - Escoamento +10°.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N	L_{PL} (m)	ΔL_{PL} (m)	N
VISUALIZAÇÃO						
$U_{LS} = 0,22$						
$U_{GS} = 0,78$	0,59	0,21	14	0,32	0,12	16
$U_{GS} = 1,52$	1,22	0,42	11	0,36	0,13	15
$U_{GS} = 1,98$	1,51	0,56	11	0,32	0,15	13
$U_{LS} = 0,49$						
$U_{GS} = 0,77$	0,33	0,09	12	0,31	0,16	12
$U_{GS} = 1,57$	0,70	0,24	10	0,32	0,10	12
$U_{GS} = 2,00$	1,13	0,40	9	0,34	0,17	11
$U_{LS} = 1,08$						
$U_{GS} = 0,76$	0,12	0,04	16	0,17	0,11	15
$U_{GS} = 1,52$	0,26	0,11	11	0,22	0,09	11
$U_{GS} = 1,94$	0,35	0,14	10	0,28	0,11	10

Tabela 20: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	V_{CB} (m/s)	ΔV_{CB} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,78$	1,72	0,35	1,67	0,22	1,69	0,22	10
$U_{GS} = 1,11$	1,97	0,25	1,94	0,17	1,96	0,17	19
$U_{GS} = 1,55$	2,19	0,34	2,35	0,28	2,27	0,23	8
$U_{LS} = 1,35$							
$U_{GS} = 0,77$	1,85	0,29	1,95	0,23	1,90	0,20	11
$U_{GS} = 1,10$	2,37	0,42	2,36	0,34	2,36	0,23	12
$U_{GS} = 1,54$	2,86	0,53	3,14	0,55	3,00	0,37	11
$U_{LS} = 1,62$							
$U_{GS} = 0,74$	2,31	0,74	2,19	0,58	2,25	0,56	13
$U_{GS} = 1,03$	2,62	0,43	2,63	0,56	2,63	0,29	10
$U_{GS} = 1,44$	2,96	0,56	2,60	0,78	2,78	0,49	8

Escoamento Inclinado, $\beta = -2,5^\circ$

A tabela 20 apresenta valores médios das velocidades e respectivos desvios padrões das bolhas alongadas para diferentes pares de velocidades superficiais gás-líquido obtidos pela técnica ultra-sônica.

A tabela 21 apresenta valores das velocidades e desvios padrões de componentes dos pistões de líquido em diferentes pares de velocidades superficiais medidas pela técnica ultra-sônica. São apresentadas as velocidades médias da frente do pistão de líquido (V_{FPL}), da parte posterior (V_{PPL}), a média do pistão de líquido (V_{MPL}) e os respectivos desvios padrões (Δ).

A tabela 22 apresenta os comprimentos médios das bolhas alongadas (L_B) e dos pistões de líquido (L_{PL}), com os respectivos desvios padrões (Δ), medidos pela técnica ultra-sônica.

Tabela 21: Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{FPL} (m/s)	ΔV_{FPL} (m/s)	V_{PPL} (m/s)	ΔV_{PPL} (m/s)	V_{MPL} (m/s)	ΔV_{MPL} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,78$	1,67	0,22	1,72	0,35	1,69	0,25	10
$U_{GS} = 1,11$	1,96	0,14	1,99	0,26	1,98	0,16	19
$U_{GS} = 1,55$	2,20	0,41	2,26	0,39	2,23	0,28	9
$U_{LS} = 1,35$							
$U_{GS} = 0,77$	1,91	0,24	1,85	0,29	1,88	0,23	11
$U_{GS} = 1,10$	2,40	0,50	2,40	0,38	2,40	0,39	12
$U_{GS} = 1,54$	2,99	0,53	3,03	0,48	3,01	0,32	10
$U_{LS} = 1,62$							
$U_{GS} = 0,74$	2,12	0,55	2,31	0,74	2,21	0,54	13
$U_{GS} = 1,03$	2,49	0,60	2,87	0,71	2,68	0,45	11
$U_{GS} = 1,44$	2,78	0,80	2,86	0,56	2,82	0,25	8

Tabela 22: Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica - Escoamento $-2,5^\circ$.

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N	L_{PL} (m)	ΔL_{PL} (m)	N
ULTRA-SOM						
$U_{LS} = 1,08$						
$U_{GS} = 0,78$	0,23	0,08	10	0,23	0,13	10
$U_{GS} = 1,11$	0,21	0,07	19	0,20	0,10	19
$U_{GS} = 1,55$	0,35	0,18	8	0,19	0,11	9
$U_{LS} = 1,35$						
$U_{GS} = 0,77$	0,15	0,04	11	0,16	0,07	11
$U_{GS} = 1,10$	0,17	0,09	12	0,18	0,07	12
$U_{GS} = 1,54$	0,29	0,20	13	0,23	0,14	10
$U_{LS} = 1,62$						
$U_{GS} = 0,74$	0,17	0,05	13	0,15	0,10	13
$U_{GS} = 1,03$	0,14	0,04	11	0,18	0,08	13
$U_{GS} = 1,44$	0,17	0,04	8	0,15	0,04	8

Tabela 23: Velocidades da bolha alongada obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5° .

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{NB} (m/s)	ΔV_{NB} (m/s)	V_{CB} (m/s)	ΔV_{CB} (m/s)	V_{MB} (m/s)	ΔV_{MB} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 0,81$							
$U_{GS} = 0,76$	1,42	0,19	1,49	0,14	1,45	0,16	9
$U_{GS} = 1,50$	2,15	0,19	2,19	0,31	2,17	0,21	9
$U_{GS} = 1,93$	2,74	0,47	2,53	0,52	2,63	0,33	8
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,80$	1,80	0,41	1,78	0,27	1,79	0,27	10
$U_{GS} = 1,52$	2,26	0,27	2,05	0,30	2,18	0,12	10
$U_{GS} = 2,02$	2,67	0,44	2,80	0,40	2,74	0,37	9
$U_{LS} = 1,62$							
$U_{GS} = 0,79$	2,33	0,42	2,05	0,46	2,19	0,40	9
$U_{GS} = 1,59$	2,73	0,38	2,59	0,35	2,66	0,26	13
$U_{GS} = 1,98$	2,84	0,32	2,96	0,57	2,90	0,29	9

Escoamento Inclinado, $\beta = -5^\circ$

A tabela 23 apresenta valores médios das velocidades e respectivos desvios padrões das bolhas alongadas para diferentes pares de velocidades superficiais gás-líquido obtidos pela técnica ultra-sônica.

A tabela 24 apresenta valores das velocidades e desvios padrões de componentes dos pistões de líquido em diferentes pares de velocidades superficiais medidas pelas técnicas ultra-sônicas e por visualização. São apresentadas as velocidades médias da frente do pistão de líquido (V_{FPL}), da parte posterior (V_{PPL}), a média do pistão de líquido (V_{MPL}) e os respectivos desvios padrões (Δ).

A tabela 25 apresenta os comprimentos médios das bolhas alongadas (L_B) e dos pistões de líquido (L_{PL}), com os respectivos desvios padrões (Δ), medidos pela técnica ultra-sônica.

Tabela 24: Velocidades do pistão de líquido obtidas pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5° .

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	V_{FPL} (m/s)	ΔV_{FPL} (m/s)	V_{PPL} (m/s)	ΔV_{PPL} (m/s)	V_{MPL} (m/s)	ΔV_{MPL} (m/s)	N
ULTRA-SOM							
$U_{LS} = 0,81$							
$U_{GS} = 0,76$	1,50	0,19	1,43	0,20	1,47	0,10	9
$U_{GS} = 1,50$	2,18	0,29	2,17	0,21	2,18	0,17	10
$U_{GS} = 1,93$	2,70	0,55	2,71	0,49	2,70	0,31	9
$U_{LS} = 1,08$							
$U_{GS} = 0,80$	1,80	0,29	1,80	0,41	1,80	0,22	10
$U_{GS} = 1,52$	2,08	0,28	2,18	0,38	2,13	0,23	11
$U_{GS} = 2,02$	2,71	0,48	2,62	0,44	2,67	0,38	10
$U_{LS} = 1,62$							
$U_{GS} = 0,79$	2,06	0,52	2,59	0,93	2,32	0,45	10
$U_{GS} = 1,59$	2,66	0,50	2,73	0,38	2,69	0,38	13
$U_{GS} = 1,98$	3,23	1,71	2,63	0,29	2,93	0,83	10

Tabela 25: Comprimentos médios das bolhas alongadas e pistões de líquido obtidos pela técnica ultra-sônica - Escoamento -5° .

<i>Velocidades superficiais (m/s)</i>	L_B (m)	ΔL_B (m)	N	L_{PL} (m)	ΔL_{PL} (m)	N
ULTRA-SOM						
$U_{LS} = 0,81$						
$U_{GS} = 0,76$	0,34	0,07	9	0,43	0,2	9
$U_{GS} = 1,50$	0,36	0,12	9	0,29	0,09	10
$U_{GS} = 1,93$	0,61	0,31	8	0,30	0,20	9
$U_{LS} = 1,08$						
$U_{GS} = 0,80$	0,32	0,14	10	0,37	0,11	10
$U_{GS} = 1,52$	0,33	0,23	10	0,23	0,11	11
$U_{GS} = 2,02$	0,58	0,36	9	0,27	0,17	10
$U_{LS} = 1,62$						
$U_{GS} = 0,79$	0,17	0,03	9	0,26	0,09	10
$U_{GS} = 1,59$	0,21	0,08	13	0,16	0,07	13
$U_{GS} = 1,98$	0,43	0,25	9	0,25	0,25	10