

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**ANÁLISE DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS ÁGUA-AR EM  
MICRO-CANAIS PARALELOS**

**Dissertação submetida à**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**Para obtenção de grau de**

**MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**EDUARDO XAVIER BARRETO**

Florianópolis, setembro de 2010.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**ANÁLISE DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS ÁGUA-AR EM  
MICRO-CANAIS PARALELOS**

**EDUARDO XAVIER BARRETO**

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de**

**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA  
sendo aprovada em sua forma final.**

---

**Prof. Júlio César Passos, Dr. – Orientador**

---

**Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc- Coordenador do Programa**

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Amir Antônio Martins de Oliveira Jr, Ph.D - Presidente**

---

**Prof.<sup>a</sup> Márcia Barbosa Henriques Mantelli, Ph.D**

---

**Prof. Jader Riso Barbosa Junior, Ph.D**

---

**Prof. Emilio Ernesto Paladino, Dr.**

“Comece fazendo o que é necessário,  
depois o que é possível, e de repente  
você estará fazendo o impossível”.

(São Francisco de Assis)

Aos meus pais, Gilda e Luiz,  
por todo amor e incentivo.

## AGRADECIMENTOS

À minha família Luiz, Gilda, Marcia, Suely (em memória) e minha amada Cariny.

Ao Prof. Júlio César Passos pela oportunidade oferecida e pela disponibilidade que demonstrou ao longo da orientação.

Aos técnicos Danti Régis e Luiz Domingos cujo trabalho foi fundamental para a construção da bancada.

Aos estagiários Michel Smeets e Mariana Ayres, pela contribuição significativa.

Aos amigos e colegas Reinaldo de Souza, Rodrigo Corrêa, Fábbyo Pereira, Cirilo Bresolin, Leonardo Slongo, Evandro Dário, Gil Goss, Eduardo Veronese, Raphael Miyake, Fábio Kleveston, Renzo Figueroa, Franco, Mariana Tiemi, Kleber Paiva, Isac Zandonai, Stefano Macarini, Leila Valadares, Amaury Rainho, Estevan Grosch, Sidnei Maeda, Ana Silva, Tadeu Miranda, Paulo dos Santos, Pablo de Oliveira, Pablo Horacio Guiñazu, Andrés Nicolás D'Alessandro, Edvaldo e demais colegas pela amizade e companheirismo nessa etapa da vida.

Ao CNPq pelo apoio financeiro.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xvi</b>
<b>SIMBOLOGIA</b> .....	<b>xviii</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xxi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xxii</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
2.1. Definição de micro-canais .....	3
2.2. Regimes de escoamento e mapas de padrões de fluxo .....	5
2.3. Relações básicas para escoamento bifásico .....	9
2.4. Correlações para a queda de pressão em um único micro- canal .....	11
2.4.1. Modelo para queda de pressão monofásica por atrito viscoso .....	12
2.4.2. Modelo homogêneo .....	14
2.4.3. Modelo de fases separadas .....	15
2.4.4. Correlação de Chisholm (1972) .....	20
2.4.5. Correlação de Friedel (1979) .....	22
2.4.6. Correlação de Muller-Steinhagen e Heck (1986) .....	23
2.5. Correlações para fração de vazio em um único micro-canal .....	26
2.6. Correlação para queda de pressão em micro-canais paralelos .....	30

2.7. Correlações para fração de vazio em micro-canais paralelos .....	34
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>37</b>
3.1. Descrição geral .....	37
3.2. Os canais .....	40
3.3. Sensores e dispositivos de medição .....	42
3.4. Sensor de fração de vazio .....	45
3.4.1. Modelo elétrico elementar .....	48
3.5. Aquisição de dados .....	50
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS PARA UM ÚNICO MICRO-CANAL.....</b>	<b>51</b>
4.1. Queda de pressão monofásica para um micro-canal .....	52
4.2. Queda de pressão bifásica para um micro-canal .....	55
4.3. Análise dos diferentes regimes de escoamento .....	63
4.3.1. Critério para transição dos regimes de escoamento .....	63
4.3.2. Visualizações .....	64
4.4. Avaliação da fração de vazio para um micro-canal .....	70
4.5. Resumo do capítulo .....	78
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS PARA O ESCOAMENTO SIMULTÂNEO EM SETE MICRO-CANAI PARALELOS.....</b>	<b>80</b>
5.1. Frações temporais dos regimes de escoamento .....	81
5.2. Queda de pressão bifásica para o escoamento simultâneo em sete micro-canais paralelos .....	85
5.3. Avaliação da fração de vazio para sete micro-canais .....	89

5.4. Visualizações .....	92
5.5. Resumo do capítulo .....	95
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>96</b>
6.1 Conclusões .....	96
6.2 Recomendações .....	98
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO I - CRITÉRIO PARA TRANSIÇÃO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO PARA MINI- E MICRO-CANAIS COM FLUXO ASCENDENTE.....</b>	<b>104</b>
I.1. Transição entre regime borbulhado e regime pistonado..	104
I.2. Transição entre regime pistonado e regime agitado.....	105
I.3. Transição entre regime agitado e regime anular .....	111
<b>ANEXO II - MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DAS CURVAS DE AJUSTE PARA FRAÇÕES DE TEMPO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO.....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO III - ANÁLISE DE INCERTEZAS .....</b>	<b>115</b>
III.1. Mensurando variável .....	115
III.2. Incerteza padrão.....	116
III.3. Aplicações.....	119
III.4. RMS dos desvios dos pontos calculados em relação aos medidos.....	121
III.5. Certificado de medição do micro-canal .....	121
<b>ANEXO IV - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO – CIRCUITO ELETRÔNICO .....</b>	<b>122</b>

**ANEXO V – ANÁLISE VISUAL DAS FRAÇÕES TEMPORAIS  
DOS REGIMES DE ESCOAMENTO ..... 124**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Regimes de escoamento observados por Mishima e Hibiki (1996).....	6
Figura 2.2: Mapa de padrões de escoamento: $D_h = 2,05\text{ mm}$ , observados por Mishima e Hibiki (1996).....	7
Figura 2.3: Mapa de padrões de escoamento: $D_h = 4,08\text{ mm}$ , observados por Mishima e Hibiki (1996).....	8
Figura 2.4: Dados experimentais de $C / X$ , obtidos por Revellin <i>et al.</i> (2007).....	18
Figura 2.5: Parâmetro $C$ como função do diâmetro do tubo, conforme Mishima e Hibiki (1996).....	19
Figura 2.6: Parâmetro $C$ para tubos circulares e retangulares, conforme Mishima e Hibiki (1996).....	20
Figura 2.7: Comparação entre o modelo Homogêneo e os resultados experimentais.....	24
Figura 2.8: Comparação entre o modelo de Lockhart e Martinelli e os resultados experimentais.....	25
Figura 2.9: Comparação da correlação de Chisholm e os resultados experimentais.....	25
Figura 2.10: Comparação da correlação de Muller-Steinhagen e os resultados experimentais.....	26
Figura 2.11: Comparação entre as frações de vazio medidas e as correlações da literatura, conforme Tripplet <i>et al.</i> (1999) .....	29
Figura 2.12: Correlações e dados experimentais para o gradiente de pressão em função do título, $x$ , do R410A, a $10\text{ }^\circ\text{C}$ , conforme Jassim <i>et al.</i> (2006).....	33

Figura 2.13: Correlações e dados experimentais para o gradiente de pressão em função do título, $x$ , do R134a, a 10 °C, conforme Jassim <i>et. al</i> (2006).....	34
Figura 2.14: Correlações e dados experimentais para a fração de vazio em função do título, $x$ , do R410a, a 10 °C, conforme Jassim <i>et. al</i> (2006).....	35
Figura 2.15: Correlações e dados experimentais para a fração de vazio em função do título, $x$ , do R134a, a 10 °C, conforme Jassim <i>et. al</i> (2006).....	36
Figura 3.1: Configuração experimental.....	38
Figura 3.2: Fotografia geral da bancada experimental.....	39
Figura 3.3: Misturador de fases.....	39
Figura 3.4: Seção de teste, (a) fotografia e (b) esquema, medidas em <i>mm</i> .....	40
Figura 3.5: Detalhes do manifold inferior, mostrando a conexão de entrada dos micro-canais.....	41
Figura 3.6: Seção transversal com as dimensões do diâmetro interno e externo dos micro-canais.....	41
Figura 3.7: Transdutores de pressão: (a) diferencial, (b) absoluta.....	42
Figura 3.8: Rotâmetro para medição da vazão de água.....	43
Figura 3.9: Dispositivo de medição de vazão de ar, MVG-3.....	44
Figura 3.10: Calibração do dispositivo de vazão de ar.....	44
Figura 3.11: Sensor de impedância elétrica: EE – eletrodo emissor, EC – eletrodo coletor, FI – fita de isolamento entre os eletrodos.....	45
Figura 3.12: Representação do campo elétrico entre os eletrodos e o escoamento bifásico.....	45

Figura 3.1: Diagrama representativo do circuito eletrônico, Rocha (2006).....	47
Figura 3.14: Esquema do circuito elétrico equivalente do transdutor de impedância circuito RC.....	48
Figura 4.1: Comparação entre os resultados experimentais para o escoamento laminar e o fator de atrito teórico.....	52
Figura 4.2: Queda de pressão para o escoamento de água.....	53
Figura 4.3: Comparação entre os resultados experimentais e o coeficiente de atrito teórico do ar.....	54
Figura 4.4: Queda de pressão para o escoamento de ar.....	55
Figura 4.5: Queda de pressão bifásica, $j_g = 0,008 \text{ m/s}$ , $G_g = 0,01 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	56
Figura 4.6: Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados, $j_g = 0,008 \text{ m/s}$ , $G_g = 0,01 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	56
Figura 4.7: Queda de pressão bifásica, $j_g = 0,11 \text{ m/s}$ , $G_g = 0,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	57
Figura 4.8: Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados, $j_g = 0,11 \text{ m/s}$ , $G_g = 0,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	57
Figura 4.9: Queda de pressão bifásica, $j_g = 0,8 \text{ m/s}$ , $G_g = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	58
Figura 4.10: Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados, $j_g = 0,8 \text{ m/s}$ , $G_g = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	58
Figura 4.11: Queda de pressão bifásica, $j_g = 6,6 \text{ m/s}$ , $G_g = 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	59
Figura 4.12: Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados, $j_g = 6,6 \text{ m/s}$ , $G_g = 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	59

Figura 4.13: Queda de pressão bifásica, $j_g = 11 \text{ m/s}$ , $G_g = 13 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	60
Figura 4.14: Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados, $j_g = 11 \text{ m/s}$ , $G_g = 13 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	60
Figura 4.15: Queda de pressão bifásica, $j_g = 15 \text{ m/s}$ , $G_g = 18 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	61
Figura 4.16: Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados, $j_g = 15 \text{ m/s}$ , $G_g = 18 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	61
Figura 4.17: Pontos experimentais sobre o mapa de padrões de Mishima e Ishii (1983).....	64
Figura 4.18: Fotografias representativas dos escoamentos bifásicos, regimes borbulhado e borbulhado-pistonado.....	65
Figura 4.19: Fotografias representativas dos escoamentos bifásicos, regimes pistonado e pistonado-anular.....	65
Figura 4.20: Fotografias representativas dos escoamentos bifásicos, regimes agitado e anular.....	66
Figura 4.21: Razão entre o modelo de Friedel e a queda de pressão medida.....	67
Figura 4.22: Razão entre o modelo de Lockhart-Martinelli e a queda de pressão medida.....	68
Figura 4.23: Valores da fração de vazio para $G_g = 0,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	71
Figura 4.24: Valores da fração de vazio para $G_g = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	71
Figura 4.25: Valores da fração de vazio para $G_g = 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	72
Figura 4.26: Valores da fração de vazio para $G_g = 13 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	72
Figura 4.27: Valores da fração de vazio para $G_g = 18 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	73

Figura 4.28: Fotografias dos tipos de escoamento obtidas nos testes de fração de vazio.....	74
Figura 4.29: Variações do sinal instantâneo para regime pistonado: $j_g = 0,11 \text{ m/s}$ e $j_l = 0,06 \text{ m/s}$ .....	75
Figura 4.30: Variações do sinal instantâneo para regime borbulhado: $j_g = 0,02 \text{ m/s}$ e $j_l = 1,24 \text{ m/s}$ .....	76
Figura 4.31: Variações do sinal instantâneo para regime anular: $j_g = 15 \text{ m/s}$ e $j_l = 1,54 \text{ m/s}$ .....	76
Figura 4.32: Variações do sinal instantâneo para regime agitado: $j_g = 0,80 \text{ m/s}$ e $j_l = 0,36 \text{ m/s}$ .....	77
Figura 5.1: Pontos experimentais do presente trabalho no mapa probabilístico das frações temporais dos regimes de escoamento para $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , Niño (2002).....	83
Figura 5.2: Pontos experimentais do presente trabalho no mapa probabilístico das frações temporais dos regimes de escoamento para $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , Niño (2002).....	83
Figura 5.3: Pontos experimentais do presente trabalho no mapa probabilístico das frações temporais dos regimes de escoamento.....	84
Figura 5.4: Pontos experimentais do presente trabalho no mapa probabilístico das frações temporais dos regimes de escoamento para $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , Niño (2002).....	84
Figura 5.5: Queda de pressão do escoamento bifásico através de sete micro-canais paralelos, $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	85
Figura 5.6: Queda de pressão do escoamento bifásico através de sete micro-canais paralelos, $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	86
Figura 5.7: Queda de pressão do escoamento bifásico através de sete micro-canais paralelos, $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	86

Figura 5.8: Queda de pressão do escoamento bifásico através de sete micro-canais paralelos, $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	87
Figura 5.9: Valores da fração de vazio para $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	89
Figura 5.10: Valores da fração de vazio para $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	90
Figura 5.11: Valores da fração de vazio para $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	90
Figura 5.12: Valores da fração de vazio para $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	91
Figura 5.13: Fotografias do escoamento bifásico água-ar em sete micro-canais paralelos.....	94
Figura I.1: Modelo de escoamento pistonado.....	106
Figura III.1: Laudo de medição do micro-canal com $D_h = 1,22 \text{ mm}$ ....	121
Figura IV.1: Circuito de transdução eletrônica dos sinais, incluídos a geração e pós-tratamento dos dados – Parte A.....	122
Figura IV.2: Circuito de transdução eletrônica dos sinais, incluídos a geração e pós-tratamento dos dados – Parte B.....	123
Figura V.1: Fotografias do escoamento bifásico ar-água no interior de sete micro-canais para $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $x = 0,03$ .....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores de $C$ para diferentes tipos de escoamento, segundo Collier e Thome (1996).....	17
Tabela 2.2: Estatísticas das correlações avaliadas para todos os dados.....	24
Tabela 4.1: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G_g = 0,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	62
Tabela 4.2: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G_g = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	62
Tabela 4.3: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G_g = 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	62
Tabela 4.4: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G_g = 13 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	62
Tabela 4.5: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G_g = 18 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	63
Tabela 4.6: Estatísticas dos regimes de escoamento com relação à razão entre a queda de pressão prevista por Friedel e a queda de pressão dos dados experimentais.....	68
Tabela 4.7: Estatísticas dos regimes de escoamento com relação à razão entre a queda de pressão prevista por Lockhart-Martinelli e a queda de pressão dos dados experimentais.....	69
Tabela 4.8: Variância do sinal instantâneo para os regimes de escoamento analisados.....	77
Tabela 5.1: Valores das frações temporais dos regimes de escoamento para $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	81
Tabela 5.2: Valores das frações temporais dos regimes de escoamento para $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	81

Tabela 5.3: Valores das frações temporais dos regimes de escoamento para $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	82
Tabela 5.4: Valores das frações temporais dos regimes de escoamento para $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	82
Tabela 5.5: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	87
Tabela 5.6: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	88
Tabela 5.7: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	88
Tabela 5.8: Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	88
Tabela 5.9: Valores de RMS para fração de vazio dos modelos utilizados com relação ao modelo probabilístico calculado, $G = 50 \text{ kg/m}^2$ .....	91
Tabela 5.10: Valores de RMS para fração de vazio dos modelos utilizados com relação ao modelo probabilístico calculado, $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	91
Tabela 5.11: Valores de RMS para fração de vazio dos modelos utilizados com relação ao modelo probabilístico calculado, $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	92
Tabela 5.12: Valores de RMS para fração de vazio dos modelos utilizados com relação ao modelo probabilístico calculado, $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .....	92
Tabela II.1: constantes das curvas de ajuste dos regimes de escoamento para água-ar a $20^\circ\text{C}$ .....	114
Tabela V.1: Frações temporais dos regimes de escoamento bifásico ar-água para $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $x = 0,03$ .....	127

## SIMBOLOGIA

### Alfabeto latino

$A$	área total da seção transversal do tubo	$[m^2]$
$A_g$	área da seção transversal do tubo ocupada pelo gás	$[m^2]$
$A_l$	área da seção transversal do tubo ocupada pelo líquido	$[m^2]$
$D$	diâmetro interno do tubo	$[m]$
$D_h$	diâmetro hidráulico interno do tubo	$[m]$
$f$	coeficiente de atrito	$[-]$
$f_{bi}$	coeficiente de atrito bifásico	$[-]$
$f_D$	coeficiente de atrito de Darcy	$[-]$
$f_g$	coeficiente de atrito para a fase gasosa	$[-]$
$f_{go}$	coeficiente de atrito considerando a vazão total como gasosa	$[-]$
$f_l$	coeficiente de atrito para fase líquida	$[-]$
$f_{lo}$	coeficiente de atrito considerando a vazão total como líquida	$[-]$
$F$	fração temporal para ocorrência dos padrões de fluxo	$[-]$
$Fr$	número de Froude	$[-]$
$g$	aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
$G$	fluxo mássico total	$[kg/s.m^2]$
$G_g$	fluxo mássico da fase gasosa	$[kg/s.m^2]$
$G_l$	fluxo mássico da fase líquida	$[kg/s.m^2]$
$j$	velocidade superficial total	$[m/s]$
$j_g$	velocidade superficial da fase gasosa	$[m/s]$
$j_l$	velocidade superficial da fase líquida	$[m/s]$
$L_c$	comprimento capilar	$[m]$
$m$	vazão mássica total	$[kg/s]$
$m_g$	vazão mássica da fase gasosa	$[kg/s]$
$m_l$	vazão mássica da fase líquida	$[kg/s]$
$N_{conf}$	número de confinamento	$[-]$
$p$	pressão estática	$[Pa]$
$P_o$	constante de Poiseuille	$[-]$
$P_m$	perímetro molhado	$[m]$
$Q$	vazão volumétrica total	$[m^3/s]$

$Q_g$	vazão volumétrica da fase gasosa	$[m^3/s]$
$Q_l$	vazão volumétrica da fase líquida	$[m^3/s]$
$Re$	número de Reynolds	[-]
$Re_{bi}$	número de Reynolds bifásico	[-]
$Re_h$	número de Reynolds homogêneo	[-]
$Re_l$	número de Reynolds da fase líquida	[-]
$Re_{lo}$	número de Reynolds considerando a vazão total como líquida	[-]
$s$	variância	[-]
$S$	fator de escorregamento entre as fases	[-]
$v_g$	velocidade média da fase gasosa	$[m/s]$
$v_l$	velocidade média da fase líquida	$[m/s]$
$We$	número de Weber	[-]
$We_{lo}$	número de Weber considerando a vazão total como líquida	[-]
$x$	título de gás	[-]
$X^2$	parâmetro de Martinelli	[-]
$z$	comprimento do tubo	$[m]$

## Alfabeto grego

$\alpha$	fração de vazio	[-]
$\alpha_h$	fração de vazio homogênea	[-]
$\mu$	viscosidade	$[kg/m.s]$
$\mu_g$	viscosidade da fase gasosa	$[kg/m.s]$
$\mu_h$	viscosidade homogênea	$[kg/m.s]$
$\mu_l$	viscosidade da fase líquida	$[kg/m.s]$
$\rho$	massa específica	$[kg/m^3]$
$\rho_{bi}$	massa específica de mistura bifásica	$[kg/m^3]$
$\rho_g$	massa específica da fase gasosa	$[kg/m^3]$
$\rho_h$	massa específica de mistura homogênea	$[kg/m^3]$
$\rho_l$	massa específica do líquido	$[kg/m^3]$
$\sigma$	tensão superficial	$[Pa]$
$\tau_{sup}$	tensão cisalhante	$[Pa.m]$
$\phi_g^2$	multiplicador bifásico para fase gasosa	[-]

$\phi_{go}^2$	multiplicador bifásico considerando vazão total como sendo gasosa	[-]
$\phi_l^2$	multiplicador bifásico para fase líquida	[-]
$\phi_{lo}^2$	Multiplicador bifásico considerando vazão total como sendo líquida	[-]

## Subscritos

<i>ann</i>	escoamento anular
<i>bi</i>	bifásico
<i>g</i>	fase gasosa
<i>go</i>	considerando a vazão total como sendo gasosa
<i>h</i>	homogêneo
<i>int</i>	escoamento intermitente
<i>l</i>	fase líquida
<i>liq</i>	escoamento de líquido
<i>lo</i>	considerando a vazão total como sendo líquida
<i>vap</i>	escoamento de vapor

## RESUMO

No presente trabalho são analisados escoamentos bifásicos ar-água, adiabático, na vertical ascendente em um único e sete micro-canais com diâmetros hidráulicos de  $1,22 \pm 4 \mu m$ . Para escoamentos monofásicos, são testados fluxos mássicos de 50 até 2000  $kg/m^2 s$  para a água e de 20 até 130  $kg/m^2 s$  para o ar.

Para o escoamento bifásico, foram testados fluxos mássicos na faixa de 70 até 2500  $kg/m^2 s$  com o título de gás variando entre 0 a 20%. Um sensor de impedância, operando no modo resistivo com frequência de 15  $kHz$ , permite a detecção dos padrões de escoamento bifásico e de um sinal equivalente à fração de vazio. Na análise da fração de vazio, os resultados mostram que os sinais elétricos normalizados variam satisfatoriamente com os diferentes títulos de gás testados. Paralelamente à análise dos sinais elétricos normalizados são confrontadas as correlações de Baroczy e Lockhart-Martinelli. Os valores para a queda de pressão, previstos pelas correlações de Friedel e Lockhart-Martinelli, concordam satisfatoriamente com os resultados experimentais.

Para escoamentos bifásicos simultâneos no interior de sete micro-canais, são testados os fluxos mássicos,  $G$ , de 50, 100, 200 e 300  $kg/m^2 s$ , com título de gás variando de 0 até 0,9 para  $G = 50 kg/m^2 s$ , 0 até 0,5 para  $G = 100 kg/m^2 s$ , 0 até 0,25 para  $G = 200 kg/m^2 s$  e 0 até 0,16 para  $G = 300 kg/m^2 s$ .

Na predição da fração de vazio do escoamento bifásico em sete micro-canais e na comparação da queda de pressão experimental é dada especial atenção ao modelo de mapas probabilísticos, utilizado por Niño (2002). Tal modelo baseia-se nas frações temporais dos regimes de escoamento, sendo estas obtidas através da análise fotográfica.

**Palavras-chave:** Escoamento bifásico, Micro-canais, Fração de vazio, Queda de pressão.

## ABSTRACT

In the present work, adiabatic air-water two-phase flow, in upward vertical direction concerning only one and seven micro-channels with hydraulic diameter of  $1,22 \pm 4 \mu m$  is analyzed. For one phase flow, mass fluxes from 50 to 2000  $kg/m^2s$  are tested for water flow and mass fluxes from 20 to 130  $kg/m^2s$  are applied for air-flow.

Mass fluxes from 70 to 2500  $kg/m^2s$  are tested with quality ranging from 0 to 0,2 for two-phase flows. The values for air-pressure supplied from an external pressurized line have ranged from 1 to 2,6 bar of manometric pressure.

In the two-phase flow void fraction analysis, an impedance sensor was used operating on resistive method with low frequency values (15 kHz). In the void fraction analysis, the results showed that the normalized electric signal ranges satisfactorily through out the different qualities tested. Following the normalized electric signal analysis, the Baroczy and Lockhart-Martinelli correlations are shown. The pressure drop preview values from the Friedel and Lockhart-Martinelli correlations have found good agreement with experimental results.

For simultaneous two-phase flow through seven micro-channels, experimental tests are applied with mass fluxes,  $G$ , of 50, 100, 200 and 300  $kg/m^2s$  and quality ranging from 0 to 0,9 for  $G = 50 kg/m^2s$ , 0 to 0,5 for  $G = 100 kg/m^2s$ , 0 to 0,25 for  $G = 200 kg/m^2s$  and 0 to 0,16 for  $G = 300 kg/m^2s$ .

For the evaluation of two-phase flow void fraction in seven micro-channels and to compare the experimental pressure drop, special attention is given to probabilistic maps model, used by Niño (2002). This model is based on the flow regime time fractions which are obtained from photographic analysis.

**Keywords:** Two-phase flow, Micro-channels, Void fraction, Pressure drop.

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estudo sobre escoamento bifásico em micro- e mini-canais ganha importância devido ao rápido desenvolvimento de dispositivos na escala microscópica usados em várias aplicações de engenharia.

Aplicações envolvendo a utilização de canais reduzidos se fazem presentes em instrumentos de medicina, trocadores de calor compactos com elevados fluxos de calor, refrigeração de sistemas de vários tipos de equipamentos como exemplo elementos eletrônicos de alto desempenho, supercomputadores, laser de alta potência e resfriamento de reatores nucleares.

Uma vez que os efeitos da tensão superficial são destacáveis em tubos capilares, sabe-se de antemão que as características do escoamento bifásico nestes canais diferem daquelas em tubos com diâmetros internos maiores. Outras características como regime de escoamento, fração de vazio, velocidade das bolhas e queda de pressão serão diferentes daquelas encontradas em canais convencionais.

Além do efeito significativo das forças superficiais, no que se refere à motivação fenomenológica em mecânica dos fluidos, este campo emergente de pesquisa possibilita o desenvolvimento de poderosos instrumentos em miniatura para a operação em um domínio de aplicação que parecia ser impraticável no passado.

A análise do escoamento bifásico em tubos capilares paralelos, onde a alimentação faz-se através de um manifold comum, revela fenômenos interessantes, uma vez que as duas fases podem escorregar desigualmente quando entrando nos canais paralelos.

Estudos realizados por Ozawa *et al.* (1979), com escoamento ar-água em canais paralelos indicam que a injeção de ar tem um efeito destabilizante nas oscilações da queda de pressão. Por outro lado, a injeção de líquido tem um efeito estabilizante na queda de pressão, mas introduz uma pequena amplitude de oscilação nas taxas de escoamento líquido.

Numerosos modelos para a queda de pressão bifásica e fração de vazio têm sido desenvolvidos para mini e micro canais. Cada modelo é desenvolvido usando hipóteses da física que se aplicam para um regime de escoamento específico. Entretanto, modelos precisos para prever a queda de pressão e fração de vazio para todos os regimes sem descontinuidades não foram ainda encontrados na literatura.

É óbvio que uma compreensão mais profunda sobre os parâmetros que regem o escoamento através de mini e micro-canais ainda está longe

de ser atingida. Assim, os problemas para a caracterização do fluxo em canais reduzidos acabam por tornar o projeto e controle de escoamento em mini e micro-canais um desafio significante.

Os objetivos do presente trabalho são:

- relacionar os dados obtidos experimentalmente sobre a queda de pressão com modelos existentes na literatura.
- comparar os dados obtidos com um mapa de regimes de escoamento, relacionando as velocidades superficiais testadas com a análise fotográfica do escoamento bifásico.
- desenvolver e implementar um sensor que determine a fração de vazio através do princípio da impedância elétrica, utilizando o método resistivo, para escoamentos em micro-canais.
- analisar micro-canais paralelos, confrontar os dados obtidos com mapas probabilísticos existentes na literatura, onde a variação dos títulos e fluxos de massa determinam diferentes regimes de escoamento.

O trabalho é estruturado como segue: No capítulo 2, é feita a revisão bibliográfica onde são apresentados os principais modelos de queda de pressão e fração de vazio para escoamento bifásico em um único micro-canal e em sete micro-canais paralelos. No capítulo 3, é apresentada a bancada experimental incluindo os sensores de impedância e seus demais instrumentos. No capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais para um único micro-canal e confrontados com correlações da literatura; ainda é feita a visualização do fluxo e análise de mapas de regimes de escoamento. No capítulo 5, são apresentados os resultados experimentais para sete micro-canais em paralelo e sua relação com modelos probabilísticos, sua visualização e análise dos principais modelos existentes na literatura. No capítulo 6, são apresentadas conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma revisão da literatura sobre escoamento bifásico em mini e micro-canais é realizada neste capítulo.

Primeiramente, é apresentada uma análise sobre os principais parâmetros utilizados na definição de micro-canais. Em seguida é feita uma abordagem sobre os diferentes regimes de escoamento bifásico em micro-canais e os resultados obtidos na literatura na tentativa de prever os diferentes padrões de fluxo.

Ainda são definidos os conceitos básicos para a apresentação e o entendimento dos modelos referentes ao cálculo da queda de pressão e fração de vazio dos escoamentos bifásicos em um único micro-canal e em sete micro-canais paralelos.

### 2.1. Definição de micro-canais

O critério para definição de micro-canais tem sido proposto por vários autores de formas diferentes, mas principalmente baseado no comprimento capilar,  $L_c$ , conforme definição abaixo:

$$L_c = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (2.1)$$

onde  $\sigma$ ,  $g$  e  $\rho$  representam a tensão superficial, a aceleração da gravidade e a massa específica. Os subscritos  $l$  e  $g$  representam as fases líquida e gasosa, respectivamente.

O critério utilizado por Serizawa *et al* (2002) foi proposto por Suo e Griffith (1964) e considera o escoamento de fluido em um micro-canal quando:

$$\frac{L_c}{D} \geq 3,3 \quad (2.2)$$

Segundo este critério, a condição de confinamento importante ocorre quando o comprimento capilar, que só depende das propriedades do fluido em questão, ultrapassa 3,3 vezes o diâmetro do canal.

Outros autores elaboraram critérios para a definição de micro-canais baseados no diâmetro hidráulico,  $D_h$ , este definido por

$$D_h = \frac{4A}{P_m} \quad (2.3)$$

onde  $A$  corresponde à área da seção transversal do canal e  $P_m$  é o seu perímetro molhado.

Assim, seguindo o critério do diâmetro hidráulico, Kandlikar (2002) propôs a seguinte classificação:

- Canais convencionais:  $D_h > 3 \text{ mm}$
- Mini-canais:  $200 \mu\text{m} < D_h < 3 \text{ mm}$
- Micro-canais:  $10 \mu\text{m} < D_h < 200 \mu\text{m}$

Obot (2002) adotou uma definição arbitrária para micro-canais como sendo canais com diâmetro hidráulico menor que  $1,0 \text{ mm}$ ,  $D_h \leq 1 \text{ mm}$ .

O critério para definição de micro-canais estabelecido por Kew e Cornwell (1997), baseado no número de confinamento,  $N_{conf}$ , é o mais aceito na atualidade e, portanto, será usado no presente trabalho. Este critério sugere que os efeitos do confinamento tornam-se significantes para canais com diâmetro hidráulico cujo número de confinamento exceda 0,5.

$$N_{conf} = \frac{Lc}{D_h} \geq 0,5 \quad (2.4)$$

Para os canais usados neste estudo, com seção transversal circular e diâmetro hidráulico de  $1,22 \text{ mm}$ , o número de confinamento encontra-

do foi 2,23, portanto, de acordo com o critério baseado no número de confinamento, podem ser considerados como sendo micro-canais.

## 2.2. Regimes de escoamento e mapas de padrões de fluxo

Ao projetar sistemas envolvendo micro-canais, é de fundamental importância conhecer extensivamente os regimes de escoamento bifásico, Pehlivan *et al.* (2006).

Estudos sobre os padrões de escoamento bifásico em micro-canais com diferentes geometrias têm sido realizados por numerosos grupos de pesquisa. Observa-se que as características do escoamento bifásico em micro-canais diferem amplamente daquelas associadas a canais com diâmetros maiores.

Em escoamentos gás-líquido, as fases podem adotar várias configurações geométricas: estas são conhecidas como padrões de fluxo ou regimes de escoamento.

O regime de escoamento observado em um experimento é dependente de vários fatores, como as propriedades dos fluidos utilizados, inclinação dos canais com relação à horizontal bem como da geometria dos canais e seus tamanhos.

Diferentes regimes como escoamento pistonado, anular, agitado e borbulhado têm sido observados em experimentos envolvendo micro-canais. Linhas de transição entre os diferentes regimes de escoamento bifásico em mini e micro-canais têm sido geradas por inúmeros pesquisadores. Discrepâncias são observadas na comparação entre as linhas de transição geradas por diferentes autores. A razão dessas discrepâncias deve-se principalmente à dois fatores. O primeiro fator refere-se à escassez de dados relacionados a estas linhas de transição dos padrões de fluxo, o segundo fator refere-se à falta de um consenso na definição de determinados regimes de escoamento. Não é incomum um determinado regime de escoamento apresentar dois ou mesmo três nomes diferentes.

Como neste trabalho são investigados escoamentos adiabáticos verticais em micro-canais, observa-se que as velocidades superficiais da água e do gás são os principais fatores que definem o tipo de regime.

Conforme Mishima e Hibiki (1996), a Figura 2.1 representa um esquema dos regimes de escoamento observáveis em um tubo capilar e em tubos convencionais. No caso do regime borbulhado, pistonado e agitado são apresentadas as configurações específicas para os escoamentos em micro-canais, indicadas com asteriscos. A configuração apresen-

tada para o regime anular aplica-se tanto para escoamento em micro-canais como em canais convencionais. Na última configuração à direita da Figura 2.1, tem-se escoamento contínuo da fase gasosa com gotículas representando a fase líquida, as quais foram arrancadas da película líquida, ainda no regime anular e da secagem (dry-out) da película. Este fenômeno também é chamado de entranhamento.

Os regimes especiais para micro-canais apresentam as seguintes características: em escoamentos borbulhados as bolhas tendem a concentrar-se através do eixo do micro-canal. Bolhas menores formam um trem espiral, enquanto bolhas maiores com diâmetros próximos do diâmetro interno do tubo alinham-se próximas umas às outras formando trens de bolhas intermitentes, sem coalescer.

Em escoamento pistonado, as bolhas são relativamente longas e apresentam “nariz” esférico. Ainda pode ser observada uma película muito fina entre bolhas pistonadas muito longas.

No escoamento agitado, as longas bolhas pistonadas são deformadas e não mais apresentam nariz esférico. Pequenas bolhas são observáveis movendo-se rapidamente.

À medida que a velocidade da fase gasosa aumenta, ocorre o coalescimento total das bolhas no eixo do tubo. Esta configuração é definida por escoamento anular onde a fase gasosa fica separada das paredes do canal por um filme líquido.

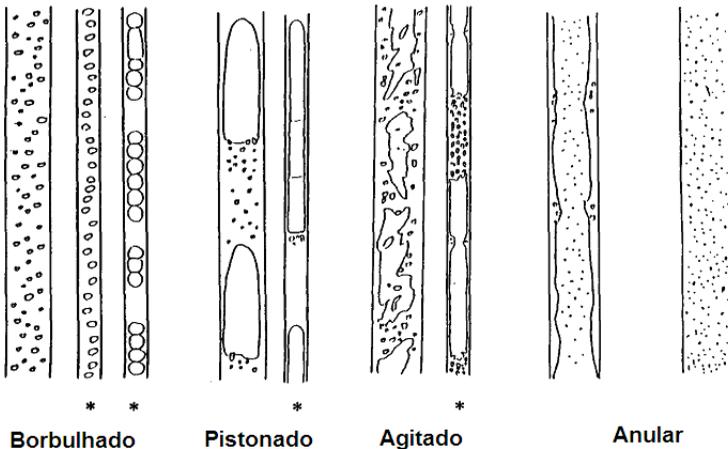


Figura 2.1: Regimes de escoamento observados por Mishima e Hibiki (1996).

Na tentativa de estabelecer parâmetros para estimar os regimes de escoamento, assim como as linhas de transição entre estes, foram elaborados mapas de padrões.

Nas Figuras 2.2 e 2.3 são mostrados os mapas de padrões de escoamento bifásico água-ar em tubos com diâmetros de 2,05 e 4,08 mm, respectivamente, conforme Mishima e Hibiki (1996). Ainda foram obtidos resultados semelhantes para diâmetros de 1,05 e 3,12 mm.

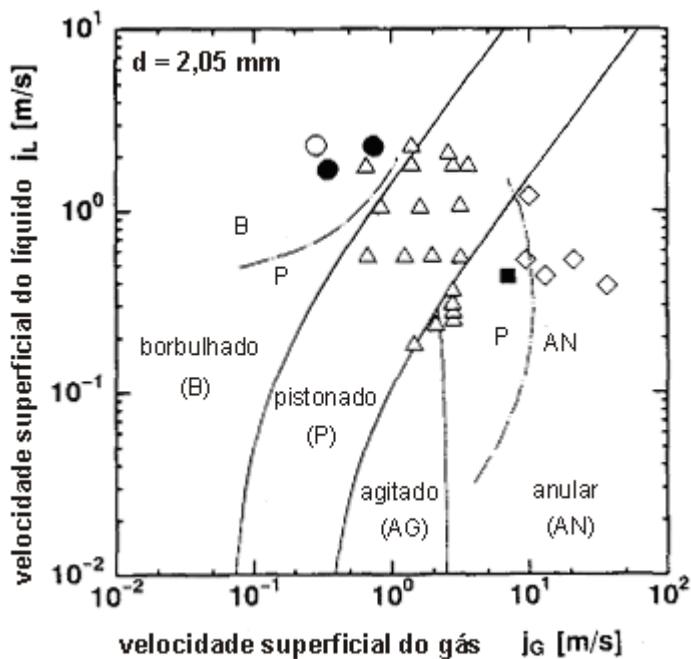


Figura 2.2: Mapa de padrões de escoamento:  $D_h = 2,05$  mm, observados por Mishima e Hibiki (1996).

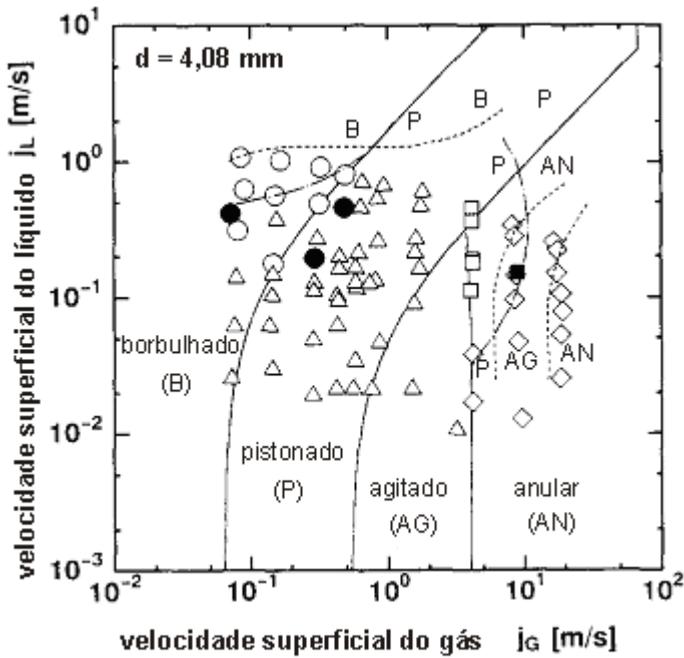


Figura 2.3: Mapa de padrões de escoamento:  $D_h = 4,08 \text{ mm}$ , observados por Mishima e Hibiki (1996).

Nas Figuras 2.2 e 2.3, os eixos verticais e horizontais representam as velocidades superficiais da fase líquida,  $j_l$  e gasosa,  $j_g$ , que são definidas como a velocidade que cada fase assumiria caso estivesse escoando sozinha no interior do tubo

$$j_g = \frac{Q_g}{A} \quad (2.5)$$

$$j_l = \frac{Q_l}{A} \quad (2.6)$$

Nas eqs. (2.5) e (2.6),  $Q_g$  e  $Q_l$  representam as vazões volumétricas da fase gasosa e líquida, respectivamente.

Ainda considerando as Figuras 2.2 e 2.3, os símbolos abertos representam os padrões de fluxo observados e equivalentes àqueles previstos por Mishima e Hibiki (1996) e os símbolos fechados representam padrões de fluxo observados e não equivalentes ao modelo previsto. As linhas sólidas representam as previsões do modelo de Mishima & Ishii (1984), enquanto que as linhas tracejadas delineiam as transições dos regimes de escoamento relatadas por Barnea *et al.* (1983) para tubos com diâmetro de 4 mm. Finalmente, as linhas tracejadas (menores) representam as fronteiras de transição reportadas por Kariyasaki *et al.* (1992) que observou regimes de escoamento em tubos circulares com diâmetro entre 1 a 4,9 mm.

### 2.3. Relações básicas para escoamento bifásico

A vazão mássica total  $\dot{m}$  pode ser expressa como o somatório das vazões mássicas do gás,  $\dot{m}_g$ , e do líquido,  $\dot{m}_l$ .

$$\dot{m} = \dot{m}_g + \dot{m}_l \quad (2.7)$$

As vazões mássicas do gás e do líquido podem, ainda, ser relacionadas com as vazões volumétricas  $Q_g$  e  $Q_l$  do gás e do líquido, conforme abaixo.

$$\dot{m}_g = \rho_g Q_g = \rho_g v_g A_g \quad (2.8)$$

$$\dot{m}_l = \rho_l Q_l = \rho_l v_l A_l \quad (2.9)$$

Nas equações acima,  $v$  e  $A$  representam a velocidade média e a área ocupada por cada fase, respectivamente.

A área de seção transversal total do micro-canal é expressa a seguir

$$A = A_g + A_l \quad (2.10)$$

Analogamente, a vazão volumétrica total pode ser formulada como

$$Q = Q_g + Q_l \quad (2.11)$$

Nos cálculos envolvendo escoamentos bifásicos, frequentemente usamos o fluxo mássico. Este é definido como a soma dos fluxos mássicos das fases gasosa e líquida, Collier e Thome (1996):

$$G = G_g + G_l = \frac{\dot{m}_g}{A} + \frac{\dot{m}_l}{A} \quad (2.12)$$

A fração de vazão é definida como sendo a razão entre a área ocupada pelo gás,  $A_g$ , e a área total da seção transversal,  $A$

$$\alpha = \frac{A_g}{A} \quad (2.13)$$

Outro parâmetro frequentemente usado é o título de gás,  $x$ , que representa a razão entre a vazão mássica de gás e a vazão mássica total.

$$x = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}} = \frac{G_g}{G} \quad (2.14)$$

O fator de escorregamento,  $S$ , definido como a razão entre a velocidade média das fases gasosa,  $v_g$ , e líquida,  $v_l$ , é representado abaixo,

$$S = \frac{v_g}{v_l} = \frac{\rho_l}{\rho_g} \frac{x}{(1-x)} \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \quad (2.15)$$

## 2.4. Correlações para a queda de pressão em um único micro-canal

A queda de pressão em escoamento bifásico no interior de micro-canais é uma importante consideração no projeto de trocadores de calor, conforme Sun *et al.* (2009). Assim, o gradiente de pressão tem sido estudado extensivamente por causa da sua aplicação em várias situações.

O gradiente de pressão total no interior de um canal pode ser calculado pela expressão abaixo, conforme Collier e Thome (1996):

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{total} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{atrito} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{gravitacional} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{aceleração} \quad (2.16)$$

onde o primeiro termo representa o gradiente de pressão devido ao atrito do fluido com as paredes do tubo, o segundo termo refere-se ao gradiente de pressão devido à ação da gravidade e o terceiro termo representa o gradiente de pressão pela aceleração do escoamento.

O gradiente de pressão por atrito do fluido com as paredes do tubo é dada por:

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_{atrito} = \frac{4\tau_{sup}}{D} \quad (2.17)$$

sendo  $\tau_{sup}$  a tensão cisalhante na parede interna do tubo e  $D$  o diâmetro do tubo.

O segundo termo refere-se ao gradiente de pressão devido à coluna bifásica e pode ser descrito como

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_{gravitacional} = \rho_{bi}g \quad (2.18)$$

onde  $\rho_{bi}$  é a massa específica do escoamento bifásico.

O terceiro termo corresponde ao gradiente de pressão por aceleração ao longo do canal, cuja expressão é dada a seguir:

$$\left( -\frac{dp}{dz} \right)_{\text{aceleração}} = G^2 \frac{d}{dz} \left( \frac{1}{\rho_{bi}} \right) \quad (2.19)$$

Segundo Collier e Thome (1996), os gradientes de pressão bifásica por atrito são comumente expressos em termos de multiplicadores bifásicos.

$$\text{Gradiente de pressão bifásico} = \text{Gradiente de pressão monofásico} \times \text{Multiplicador bifásico}$$

Assim, o gradiente de pressão bifásico por atrito pode ser escrito conforme a seguir:

$$\left( -\frac{dp}{dz} \right)_{\text{atrito}} = \left( -\frac{dp}{dz} \right)_{lo} \phi_{lo}^2 = \left( -\frac{dp}{dz} \right)_l \phi_l^2 = \left( -\frac{dp}{dz} \right)_g \phi_g^2 \quad (2.20)$$

Os subscritos  $lo$ ,  $l$  e  $g$  correspondem ao escoamento monofásico de líquido somente o qual assume o fluxo mássico total do escoamento,  $G$ , ocupado exclusivamente pela fase líquida, ao escoamento da fase líquida e ao escoamento da fase gasosa, respectivamente.

Vários modelos foram elaborados visando ao cálculo do gradiente de pressão provocado pelo atrito.

#### 2.4.1. Modelo para queda de pressão monofásica por atrito viscoso

Para escoamentos monofásicos no interior de micro-canais, utiliza-se o coeficiente de atrito de Fanning,  $f$ , sendo este definido como a razão entre a tensão de cisalhamento viscoso na parede,  $\tau_{\text{sup}}$ , e a pressão dinâmica.

$$f = \frac{\tau_{\text{sup}}}{1/2 \rho v^2} \quad (2.21)$$

O coeficiente de atrito depende de várias condições:

- Regime de escoamento laminar ou turbulento
- Escoamento em desenvolvimento ou plenamente desenvolvido
- Geometria dos canais
- Rugosidade relativa das paredes

O número de Reynolds pode ser calculado como segue:

$$\text{Re} = \frac{GD_h}{\mu} \quad (2.22)$$

sendo  $\mu$  a viscosidade dinâmica do fluido.

Para escoamento laminar ( $\text{Re} < 2100$ ), o número de Poiseuille,  $Po = f \text{Re}$  é constante. Para os micro-canais do presente estudo, cuja seção transversal é circular, este valor é 16.

Para  $\text{Re} \geq 2100$ , o coeficiente de atrito é obtido satisfatoriamente pela correlação de Blasius:

$$f = 0,0791 \text{Re}^{-0,25} \quad (2.22)$$

esta correlação é válida para um intervalo de  $2100 < \text{Re} < 10^5$  e razões  $e/D < 10^{-6}$ , sendo  $e$  a altura da rugosidade das paredes do tubo.

O coeficiente de atrito calculado nas equações acima, se refere ao atrito na região do canal para a qual o fluxo está plenamente desenvolvido. Nas regiões de entrada e saída do canal, o atrito não será considerado.

O gradiente de pressão por atrito em um escoamento monofásico é determinado pela seguinte expressão

$$\left( -\frac{dp}{dz} \right)_{\text{atrito}} = \frac{2fG^2}{D_h\rho} \quad (2.23)$$

### 2.4.2. Modelo homogêneo

No modelo homogêneo, assume-se que as velocidades do líquido e do vapor são iguais, portanto não há escorregamento entre as fases e a mistura bifásica comporta-se como um pseudo fluido monofásico com propriedades que dependem do título de gás.

A utilização deste modelo é apropriada para o caso de ocorrência do regime borbulhado com bolhas bem pequenas.

Assim, o modelo homogêneo é válido considerando as seguintes hipóteses para o escoamento:

- Fator de escorregamento  $S = 1$ , ou seja,  $v_g = v_l$ ;
- Utilização de um coeficiente de atrito,  $f_h$ , conveniente para o escoamento bifásico.

Uma vez que no escoamento homogêneo, as fases são tratadas como um único fluido é de interesse definir valores apropriados para  $\rho_h$  e  $\mu_h$ , que representam a massa específica e a viscosidade dinâmica homogêneas.

A massa específica homogênea pode ser calculada através da seguinte expressão, Collier e Thome (1996)

$$\frac{1}{\rho_h} = \frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l} \quad (2.24)$$

Correlações para definir a viscosidade homogênea foram amplamente estudadas e, de acordo com Collier e Thome (1996), as que produziram resultados satisfatórios são as seguintes

$$\frac{1}{\mu_h} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l} \quad (2.25)$$

proposta por Isbin *et al.* (1958);

$$\mu_h = \mu_g \frac{x\rho_h}{\rho_g} + \mu_l \frac{(1-x)\rho_h}{\rho_l} \quad (2.26)$$

proposta por Dukler *et al.* (1964);

O número de Reynolds para um escoamento bifásico homogêneo é definido pela equação seguinte

$$\text{Re}_h = \frac{GD_h}{\mu_h} \quad (2.27)$$

Assim como no caso monofásico, o fator de atrito pode ser obtido através do número de Reynolds para o modelo homogêneo.

$$f_h = \frac{16}{\text{Re}_h} \quad \text{para} \quad \text{Re}_h < 2100, \quad (2.28)$$

$$f_h = 0,079 \text{Re}_h^{-0,25} \quad \text{para} \quad \text{Re}_h > 2100 \quad (2.29)$$

Podemos obter uma expressão para o gradiente de pressão por atrito a partir do fator de atrito homogêneo,  $f_h$ , conforme abaixo

$$\left( -\frac{dp}{dz} \right)_h = \frac{2f_h G^2}{D_h \rho_h} \quad (2.30)$$

### 2.4.3. Modelo de fases separadas

Lockhart e Martinelli (1949) analisaram escoamentos bifásicos em tubos circulares com diâmetros variando de 1,48 mm até 25,83 mm utilizando misturas de ar com benzeno, querosene, água e vários óleos. Sua análise sobre a queda de pressão bifásica baseia-se em duas hipóteses: A primeira estabelece que a queda de pressão para as fases líquida e gasosa são as mesmas independente do regime de escoamento, desde que as variações da pressão estática na direção radial sejam insignifican-

tes. A segunda estabelece que o somatório dos volumes ocupados pelo vapor e líquido a qualquer instante são iguais ao volume total do tubo (equação da continuidade), Niño (2002).

Assim como outros modelos, o modelo de fases separadas utiliza-se dos multiplicadores bifásicos (  $\phi_l^2$ ,  $\phi_{lo}^2$  e  $\phi_g^2$  ) na determinação do gradiente de pressão por atrito. Estes valores para  $\phi$  são determinados normalmente de forma experimental.

Em (1967), Chisholm chegou às seguintes expressões para o cálculo dos multiplicadores bifásicos

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (2.31)$$

$$\phi_g^2 = 1 + CX + X^2 \quad (2.32)$$

O parâmetro de Lockhart-Martinelli (1949),  $X^2$ , das eqs. (2.31) e (2.32) é expresso da seguinte forma

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_l}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_g} \quad (2.33)$$

onde  $\left(\frac{dp}{dz}\right)_l$  e  $\left(\frac{dp}{dz}\right)_g$  são os gradientes de pressão por atrito das fases líquida e gasosa, respectivamente

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_l = f_l \frac{2G^2(1-x)^2}{D\rho_l} \quad (2.34)$$

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_g = f_g \frac{2G^2x^2}{D\rho_g} \quad (2.35)$$

Nas eqs. (2.31) e (2.32), o parâmetro,  $C$ , foi introduzido por Chisholm e seu valor não é constante, mas depende dos regimes de escoamento de cada uma das fases. Os valores de  $C$  recomendados são:

Tabela 2.1: Valores de  $C$  para diferentes tipos de escoamento, segundo Collier e Thome (1996).

líquido	gás	valor de $C$
turbulento	turbulento	20
laminar	turbulento	12
turbulento	laminar	10
laminar	laminar	5

Chega-se assim, à seguinte expressão para o gradiente de pressão por atrito segundo o modelo de fases separadas

$$\left(-\frac{dp}{dz}\right)_{bi} = \left(-\frac{dp}{dz}\right)_l \phi_l^2 = \left(-\frac{dp}{dz}\right)_g \phi_g^2 \quad (2.36)$$

Para mini e micro-canais, devido ao considerável efeito da tensão superficial, Zhang (2006) verificou que  $C$  depende do comprimento capilar,  $L_c$ , e do número de Reynolds da fase líquida,  $Re_l$ , na região de escoamento laminar. Resultados a partir de uma análise estatística mostram que o valor de  $C$  muda com o número de Reynolds. Além disso,  $C/X$  na correlação de Chisholm depende diretamente da relação entre  $Re_l$  e  $Re_g$ , especialmente quando  $Re_l$  e  $Re_g$  estão além de 2000, o que pode ser verificado na Figura 2.4. Pode-se verificar que os pontos tornam-se mais dispersos com o aumento da relação entre  $Re_g$  e  $Re_l$ .

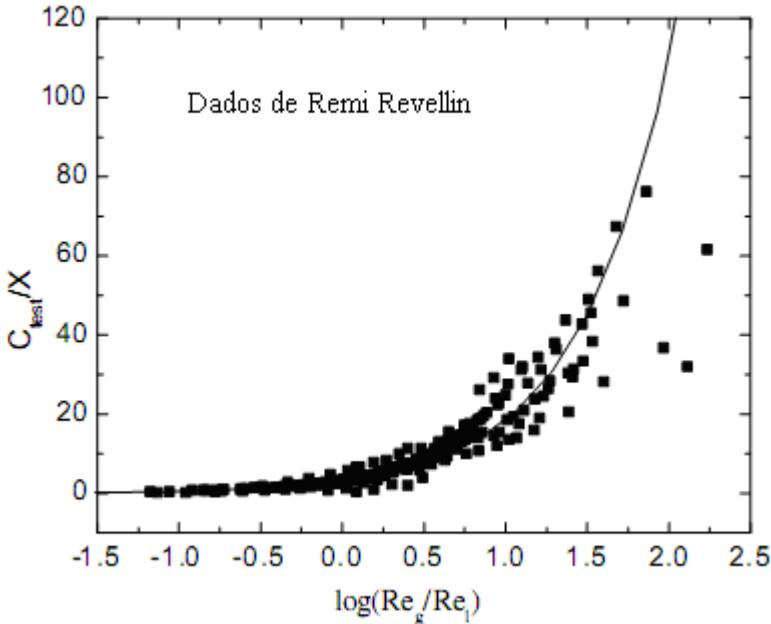


Figura 2.4: Dados experimentais de  $C/X$ , obtidos por Revellin *et al.* (2007).

Segundo Mishima *et al.* (1996), o valor do parâmetro de Chisholm diminui com a diminuição do diâmetro hidráulico dos canais. Assim, a partir de resultados experimentais com diâmetros de 1,05 e 3,12 mm, o parâmetro de Chisholm modificado é dado por

$$C = 21(1 - e^{-0,333D_h}) \quad (2.37)$$

Resultados semelhantes foram encontrados por Sugawara *et al.* (1967) para tubos capilares dispostos horizontalmente. Na Figura 2.5, são mostrados os dados obtidos por Sugawara *et al.* (1967) assim como os dados de Ungar e Cornwell (1992) para mistura bifásica amônia-vapor e comparados com a eq. (2.37). Em estudos mais recentes, Mishima *et al.* (1993) chegaram à seguinte expressão para o parâmetro  $C$  envolvendo micro-canais de seção transversal retangular

$$C = 21(1 - e^{-0,319D_h}) \quad (2.38)$$

Nas Figuras 2.5 e 2.6 são apresentados os valores de  $C$  calculados a partir das eqs. (2.37) e (2.38), respectivamente, mostrando boa concordância com os valores experimentais.

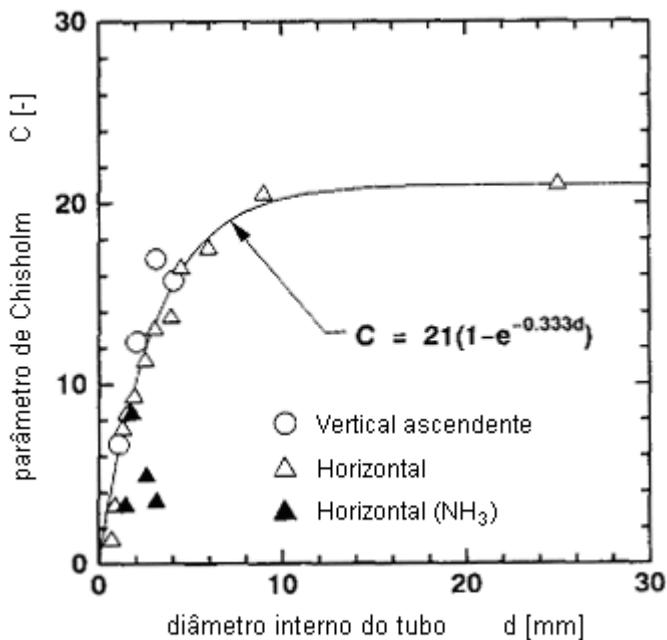


Figura 2.5: Parâmetro  $C$  como função do diâmetro do tubo, conforme Mishima e Hibiki (1996).

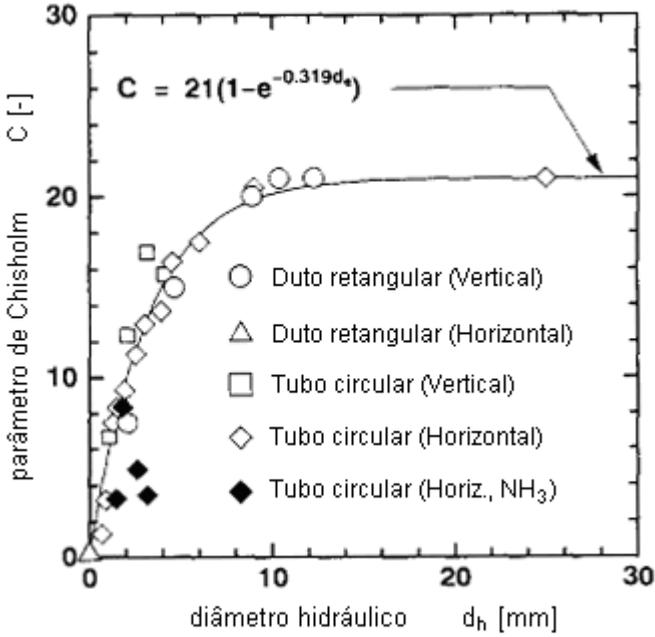


Figura 2.6: Parâmetro  $C$  para tubos circulares e retangulares, conforme Mishima e Hibiki (1996).

#### 2.4.4. Correlação de Chisholm (1972)

Chisholm chegou a uma expressão para o cálculo da queda de pressão por atrito para escoamento bifásico

$$\frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{bi}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{lo}} = 1 + (X^2 - 1)[Bx^{0,875}(1-x)^{0,875} + x^{1,75}] \quad (2.39)$$

em que  $X^2$  vale

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{go}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{lo}} \quad (2.40)$$

O valor do coeficiente  $B$  depende de  $X$  e do fluxo mássico, de acordo com Sun *et al.* (2009):

Se  $0 < X < 9,5$ ,

$$B = \frac{55}{G^{0,5}} \text{ para } G \geq 1900 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad (2.41)$$

$$B = \frac{2400}{G} \text{ para } 500 < G < 1900 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad (2.42)$$

$$B = 4,8 \text{ para } G < 500 \text{ kg/m}^2 \text{ s}. \quad (2.43)$$

Se  $9,5 < X < 28$ ,

$$B = \frac{520}{XG^{0,5}} \text{ para } G \leq 600 \text{ kg/m}^2 \text{ s} \quad (2.44)$$

$$B = \frac{21}{X} \text{ para } G > 600 \text{ kg/m}^2 \text{ s}. \quad (2.45)$$

Se  $X > 28$ ,

$$B = \frac{15000}{X^2 G^{0,5}} \quad (2.46)$$

### 2.4.5. Correlação de Friedel (1979)

Friedel (1979) desenvolveu uma correlação para o multiplicador bifásico  $\phi_{lo}^2$  realizando testes com escoamentos nas direções horizontal e vertical sendo o canal com menor diâmetro testado equivalente a 4 mm

$$\phi_{lo}^2 = \frac{\left(-\frac{dp}{dz}\right)_{bi}}{\left(-\frac{dp}{dz}\right)_{lo}} \quad (2.47)$$

O fator multiplicador monofásico  $\phi_{lo}^2$  pode ser escrito conforme abaixo:

$$\phi_{lo}^2 = E + \frac{3,24FH}{Fr^{0,045}We^{0,035}} \quad (2.48)$$

$$E = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_l f_{go}}{\rho_g f_{lo}} \quad (2.49)$$

$$F = x^{0,78} (1-x)^{0,224} \quad (2.50)$$

$$H = \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0,91} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0,19} \left(1 - \frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{0,7} \quad (2.51)$$

onde  $Fr$  e  $We$  representam os números de Froude e Weber, respectivamente e estão definidos a seguir:

$$Fr = \frac{G^2}{gD\rho_{bi}^2} \quad (2.52)$$

$$We = \frac{G^2 D}{\sigma \rho_l} \quad (2.53)$$

sendo  $f_{lo}$ ,  $f_{go}$  referentes aos coeficientes de atrito do fluxo total com propriedades de líquido e de gás, respectivamente.

A correlação de Weber é aplicável para escoamentos verticais ascendentes que obedecem à seguinte relação de viscosidade

$$\left( \frac{\mu_l}{\mu_g} \right) < 1000.$$

#### 2.4.6. Correlação de Muller-Steinhagen e Heck (1986)

Outra correlação a que se tem conhecimento é a de Muller-Steinhagen and Heck (1986).

$$\left( \frac{dp}{dl} \right)_{bi} = F(1-x)^{1/3} + \left( \frac{dp}{dl} \right)_{lo} x^3 \quad (2.54)$$

$$F = \left( \frac{dp}{dl} \right)_{lo} + 2 \left[ \left( \frac{dp}{dl} \right)_{go} - \left( \frac{dp}{dl} \right)_{lo} \right] x \quad (2.55)$$

Sun *et al.* (2009) coletou 2092 dados experimentais sobre a queda de pressão em escoamento bifásico ar-água de 18 publicações envolvendo as correlações citadas acima. A Tabela 2.2 relaciona os resultados experimentais e sua fração dentro da faixa de erro relativo de  $\pm 30\%$  e  $\pm 50\%$ .

Tabela 2.2: Estatísticas das correlações avaliadas para todos os dados.

Modelo para previsão da queda de pressão	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 30\%$	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 50\%$
Modelo Homogêneo	45,5	79,3
Lockhart e Martinelli	31,9	53,6
Chisholm (1972)	35,2	53,0
Friedel	24,7	34,7
Muller-Steinhagen	59,8	81,1

As Figuras. 2.7 a 2.10 apresentam a comparação da queda de pressão calculada pelas correlações com os dados experimentais da literatura.

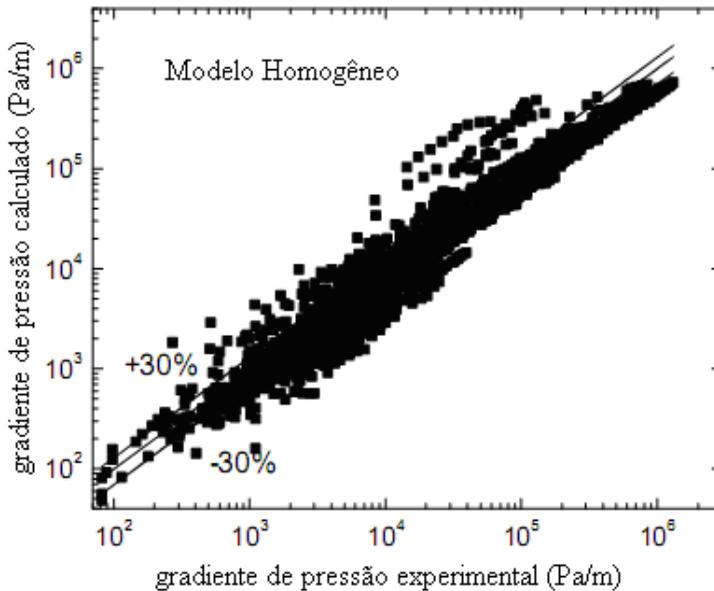


Figura 2.7: Comparação entre o modelo Homogêneo e os resultados experimentais.

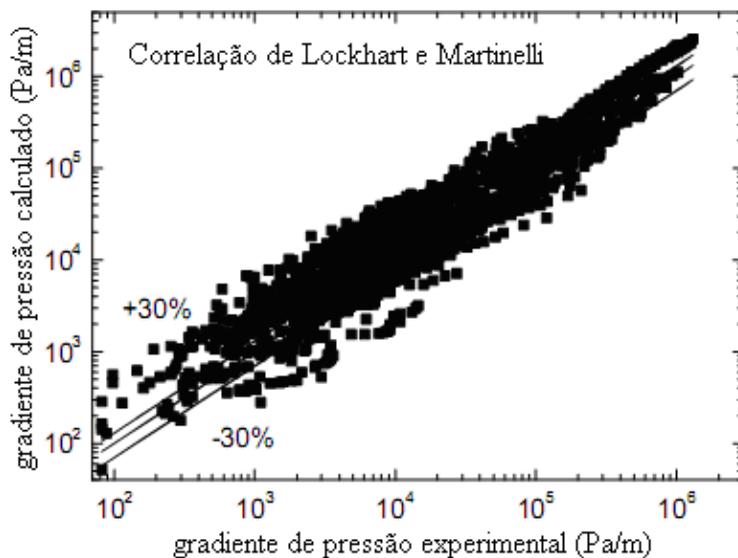


Figura 2.8: Comparação entre o modelo de Lockhart e Martinelli e os resultados experimentais.

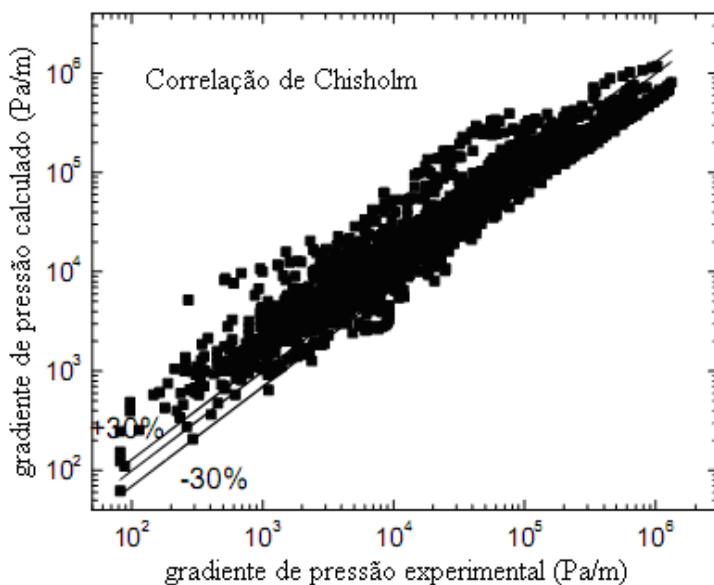


Figura 2.9: Comparação da correlação de Chisholm e os resultados experimentais.

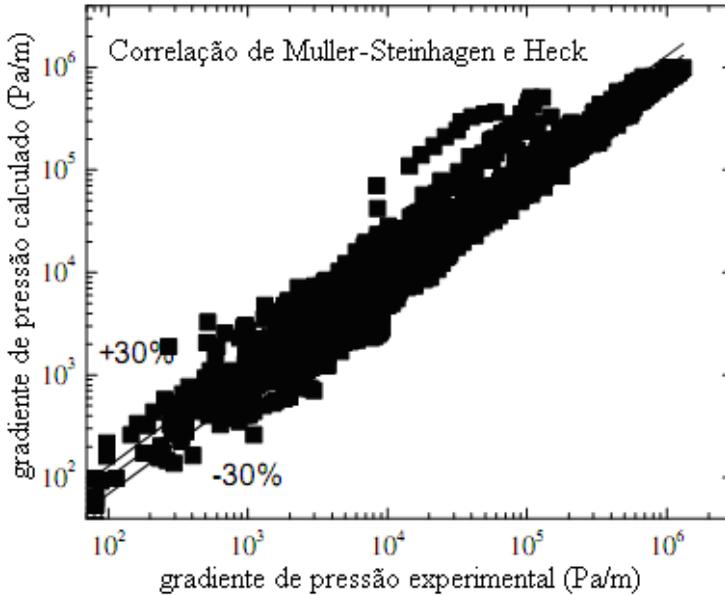


Figura 2.10: Comparação da correlação de Muller-Steinhagen e os resultados experimentais.

Os resultados das Figuras 2.7 a 2.10 ilustram que as correlações de Muller-Steinhagen e Heck apresentaram a melhor concordância com os valores experimentais seguida do modelo Homogêneo. Para os valores experimentais da literatura a correlação de Friedel não apresentou boa concordância com os valores experimentais obtidos e a correlação de Lockhart e Martinelli apresentou as maiores flutuações com relação aos valores experimentais.

## 2.5. Correlações para fração de vazio em um único micro-canai

Na literatura são mencionadas muitas correlações para calcular a fração de vazio, entretanto boa parte é válida somente para determinados padrões de fluxo.

Aqui, são apresentadas correlações para o cálculo da fração de vazio válidas independente do tipo de regime de escoamento, como é o caso da correlação de Lockhart-Martinelli (1949) e Baroczy (1963).

Triplett *et al.* (1999) estudaram a fração de vazio associada a escoamento bifásico ar-água em micro-canais circulares com 1,1 e 1,45 mm de diâmetro interno, e micro-canais semi-triangulares (triangulares com um vértice arredondado) com 1,1 e 1,5 mm de diâmetro hidráulico.

A partir da análise fotográfica, Triplett identificou os padrões de fluxo e estimou a fração de vazio média em micro-canais circulares. Cada fotografia correspondeu a um segmento de 6 mm de distância da seção de teste utilizada e foram identificados os regimes de escoamento borbulhado com bolhas de formato esféricas ou elipsoidais, pistonado com bolhas de Taylor, anular com núcleo de vapor e por fim o regime agitado onde as dificuldades para analisar os padrões de fluxo se tornaram maiores.

Assim, considerando o modelo homogêneo, onde a mistura bifásica é tratada como um pseudo fluido monofásico cujas características são definidas pelo título, o valor da fração de vazio pode ser calculado a partir da seguinte expressão

$$\alpha_h = \frac{1}{1 + \left( \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)} \quad (2.56)$$

Correlações empíricas para a fração de vazio, relacionadas com o parâmetro de Martinelli,  $X$ , e deste com o título,  $x$ , foram desenvolvidas por Lockhart e Martinelli (1949), Baroczy (1963), e Wallis (1969).

Butterworth (1975) mostrou que a correlação de Lockhart e Martinelli para fração de vazio, assim como inúmeras outras correlações para fração de vazio, pode ser representada da seguinte forma

$$\frac{1-\alpha}{\alpha} = A \left( \frac{1-x}{x} \right)^p \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^q \left( \frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^r \quad (2.57)$$

onde  $A = 0,28$ ,  $p = 0,64$ ,  $q = 0,36$  e  $r = 0,07$  para Lockhart e Martinelli, e  $A = 1$ ,  $p = 0,74$ ,  $q = 0,65$  e  $r = 0,13$  para a correlação de Baroczy, conforme Triplett *et al.* (1999).

Premoli *et al.* (1971) desenvolveram correlações empíricas para prever a fração de vazio em canais verticais, usando vários fluidos en-

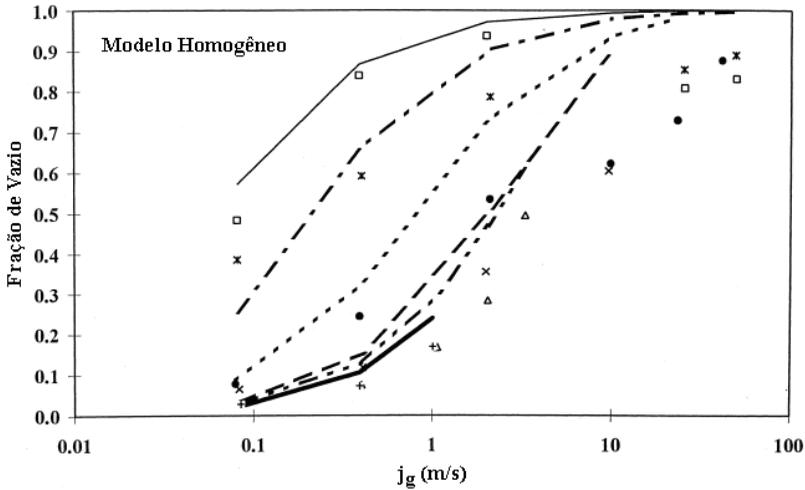
volvendo inúmeras condições de escoamento. Neste caso, foi encontrada uma correlação para o fator de escorregamento em função do número de Reynolds e do número de Weber.

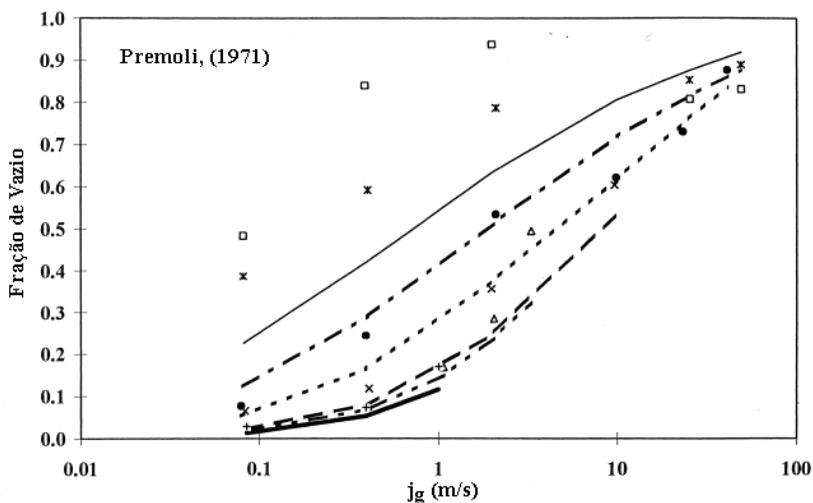
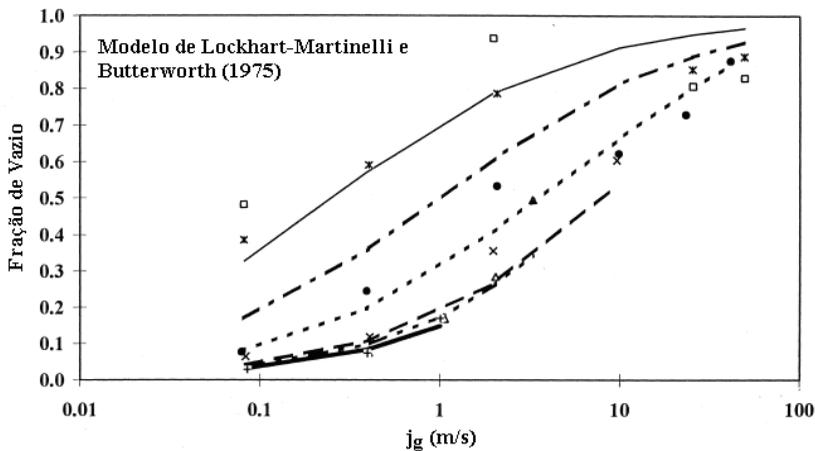
$$S = 1 + B_1 \left( \frac{y}{1 + B_2 y} - B_2 y \right)^{1/2} \quad (2.58)$$

$$B_1 = 1,578 \operatorname{Re}_l^{-0,19} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,22} \quad (2.59)$$

$$B_2 = 0,0273 \operatorname{We}_l \operatorname{Re}_l^{-0,51} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{-0,08} \quad (2.60)$$

$$y = \frac{1 - \alpha_h}{\alpha_h} \quad (2.61)$$





□	$j_l = 0.061$ m/s (Exp)	×	$j_l = 0.241$ m/s (Exp)	●	$j_l = 0.895$ m/s (Exp)
×	$j_l = 3.021$ m/s (Exp)	△	$j_l = 3.969$ m/s (Exp)	+	$j_l = 5.997$ m/s (Exp)
—	$j_l = 0.061$ m/s (Teórico)	- -	$j_l = 0.241$ m/s (Teórico)	- - -	$j_l = 0.895$ m/s (Teórico)
- -	$j_l = 3.021$ m/s (Teórico)	- - -	$j_l = 3.969$ m/s (Teórico)	—	$j_l = 5.997$ m/s (Teórico)

Figura 2.11: Comparação entre as frações de vazio medidas e as correlações da literatura, conforme Tripplet *et al.* (1999)

Na Figura 2.11 verifica-se que a fração de vazio aumenta conforme o aumento da velocidade superficial da fase gasosa,  $j_g$  e com a

diminuição da velocidade superficial do líquido,  $j_l$ , respectivamente. Nota-se que o modelo homogêneo para o cálculo da fração de vazio apresenta boa concordância com os resultados experimentais para baixos valores de  $j_g$ , correspondendo aos escoamentos bifásicos com regime borbulhado e pistonado. Para os regimes de escoamento agitado e anular, onde um fator de escorregamento significativo,  $S$ , surge em função da separação das fases líquida e gasosa, o modelo homogêneo evidentemente superestima os dados experimentais.

No modelo de Lockhart-Martinelli e Butterworth (1975) e na correlação de Premoli (1971), a fração de vazio calculada, correspondendo aos regimes de escoamento borbulhado e pistonado, encontraram boa concordância com os resultados experimentais para valores elevados de  $j_l$ , ambas as correlações superestimaram os valores experimentais de fração de vazio com relação aos regimes agitado e anular.

## 2.6. Correlação para queda de pressão em micro-canais paralelos

Muitos modelos destinados a sistemas com multi-canais têm sido encontrados na literatura, no entanto as hipóteses usadas nestes modelos aplicam-se satisfatoriamente a determinados padrões de fluxo.

Em decorrência de diversos regimes de escoamento aparecerem no mesmo canal sob uma mesma condição de fluxo mássico global, Jassim *et al.* (2006) propuseram um modelo para a queda de pressão e fração de vazio baseado em mapas probabilísticos de padrões de fluxo.

Esta técnica de modelagem foi desenvolvida de tal maneira que a visualização do escoamento foi incorporada aos modelos desenvolvidos para prever a queda de pressão e fração de vazio para uma mistura bifásica ar-água a 20°C e outros refrigerantes incluindo R410 e R134a a 10°C com valores para o fluxo mássico variando entre 50 e 300 kg/m<sup>2</sup>.s.

O aparato experimental, utilizado por Niño (2002), compunha seis micro-canais com diâmetro hidráulico de 1,54 mm e foi utilizado para obter as frações de tempo dos dados experimentais para diferentes regimes incluindo líquido, intermitente (borbulhado, pistonado e agitado), anular e vapor.

O modelo probabilístico proposto para prever a queda de pressão total em micro-canais pode ser expresso como funções das várias frações de tempo de ocorrência dos padrões de fluxo dadas por

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{total} = F_{liq}\left(\frac{dP}{dz}\right)_{liq} + F_{int}\left(\frac{dP}{dz}\right)_{int} + F_{vap}\left(\frac{dP}{dz}\right)_{vap} + F_{ann}\left(\frac{dP}{dz}\right)_{ann} \quad (2.62)$$

onde  $F_{liq}$ ,  $F_{int}$ ,  $F_{vap}$  e  $F_{ann}$ , representam as frações de tempo para a ocorrência dos regimes de escoamento líquido, intermitente (borbulhado, pistonado e agitado), vapor e anular. O ANEXO II contém a análise sobre as curvas de ajuste das frações temporais dos regimes de escoamento e seus valores conforme o título de gás e a análise visual para a obtenção das frações temporais experimentais.

Para escoamento monofásico de líquido em multi-canais, usa-se o coeficiente de atrito de Darcy para situações de regime laminar e a equação de Blasius para o cálculo do coeficiente de atrito no caso de regime turbulento

$$f_D = \frac{64}{Re} \text{ para } Re < 2300 \quad (2.63)$$

$$f_D = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} \text{ para } 2300 < Re < 10^5 \quad (2.64)$$

Assim, a queda de pressão do líquido é dada por

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{liq} = f_D \left(\frac{1}{D_h}\right) \frac{G_l^2}{2\rho_l} \quad (2.65)$$

De forma análoga à modelagem do escoamento de líquido, a queda de pressão para o vapor é expressa como

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{vap} = f_D \left(\frac{1}{D}\right) \frac{G_g^2}{2\rho_g} \quad (2.66)$$

O modelo da queda de pressão para escoamento intermitente (borbulhado, pistonado e agitado), desenvolvido por Niño (2002), assume uma massa específica homogênea da mistura bifásica para avaliar a queda de pressão.

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{int}} = 0,045 \frac{1}{D} \frac{G^2}{2\rho_h} \quad (2.67)$$

E por fim, a equação abaixo expressa o gradiente bifásico para o regime de escoamento anular

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{ann}} = \phi_{go}^2 \left(\frac{dP}{dz}\right)_{go} \quad (2.68)$$

Na eq. (2.69), o multiplicador monofásico da fase gasosa,  $\phi_{go}^2$ , é representado por

$$\phi_{go}^2 = e^{(-0,046 X_{ann})} + 0,22e^{(-0,002 X_{ann})} - e^{(-7 X_{ann})} \quad (2.69)$$

sendo

$$X_{ann} = \left[ \left( X + \frac{1}{We_v^{1,3}} \right) \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,9} \right] \quad (2.70)$$

$$We_g = \frac{(xG)^2 D}{\sigma \rho_g} \quad (2.71)$$

$$X = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{0,875} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0,5} \left( \frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0,125} \quad (2.72)$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{go} = f_{go} \frac{2G^2}{D\rho_g} \quad (2.73)$$

As Figuras. 2.12 e 2.13 ilustram o gradiente de pressão em função do título,  $x$ , para o R410A e R134a, encontrados por Niño (2002).

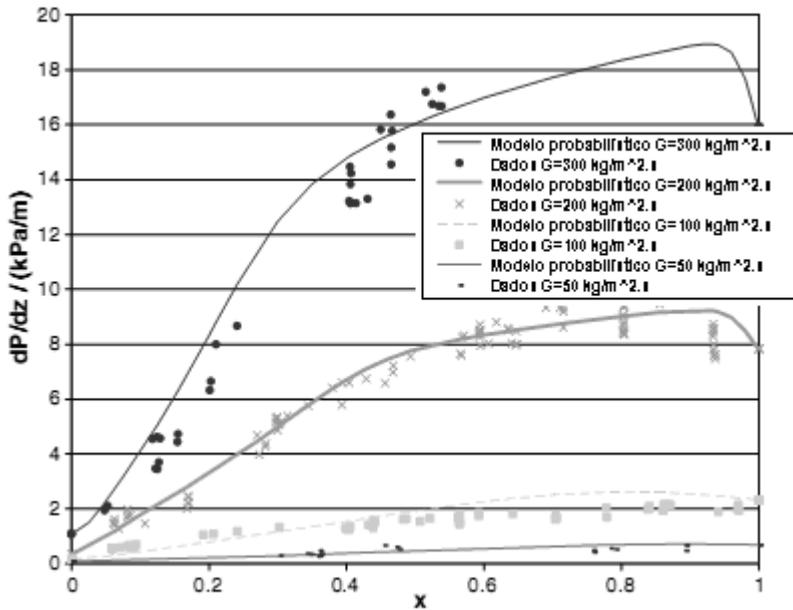


Figura 2.12: Correlações e dados experimentais para o gradiente de pressão em função do título,  $x$ , do R410A, a  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , conforme Jassim *et. al* (2006).

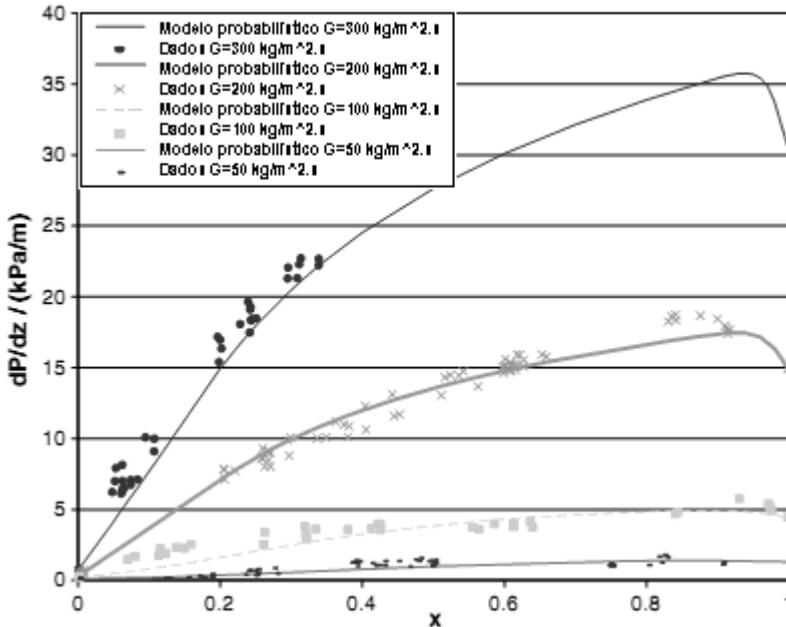


Figura 2.13: Correlações e dados experimentais para o gradiente de pressão em função do título,  $x$ , do R134a, a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme Jassim *et. al* (2006).

## 2.7. Correlações para fração de vazio em micro-canais paralelos

Semelhante à modelagem da queda de pressão, a fração de vazio total de um sistema com multi-canais foi proposta por Niño (2002) como uma função dependente das frações temporais de ocorrência dos regimes de escoamento

$$\alpha_{total} = F_{liq}\alpha_{liq} + F_{int}\alpha_{int} + F_{vap}\alpha_{vap} + F_{ann}\alpha_{ann} \quad (2.74)$$

onde  $\alpha_{liq}$  representa a fração de vazio para a fase líquida e é igual a 0, enquanto que  $\alpha_{vap}$  representa a fração de vazio para o vapor e seu valor é igual a 1.

A fração de vazio para regime intermitente,  $\alpha_{int}$ , e anular,  $\alpha_{ann}$ , são definidas como

$$\alpha_{\text{int}} = \frac{(0,833 + 0,167x)x \left( \frac{1}{\rho_g} \right)}{(1-x) \left( \frac{1}{\rho_l} \right) + x \left( \frac{1}{\rho_g} \right)} \quad (2.75)$$

$$\alpha_{\text{ann}} = \left[ 1 + \left( X + \frac{1}{We_g^{1,3}} \right) \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0,9} \right]^{-0,06} \quad (2.76)$$

A queda de pressão e fração de vazio baseadas nos mapas probabilísticos para padrões de fluxo têm mostrado boa correspondência com os dados medidos a partir de micro-canais. Entretanto, deve-se ter cuidado quando este modelo for empregado sob condições e geometrias diferentes das quais foram desenvolvidos.

As Figuras. 2.14 e 2.15 ilustram a fração de vazio vs. título,  $x$ , para o R410A e R134a, encontrados por Niño (2002).

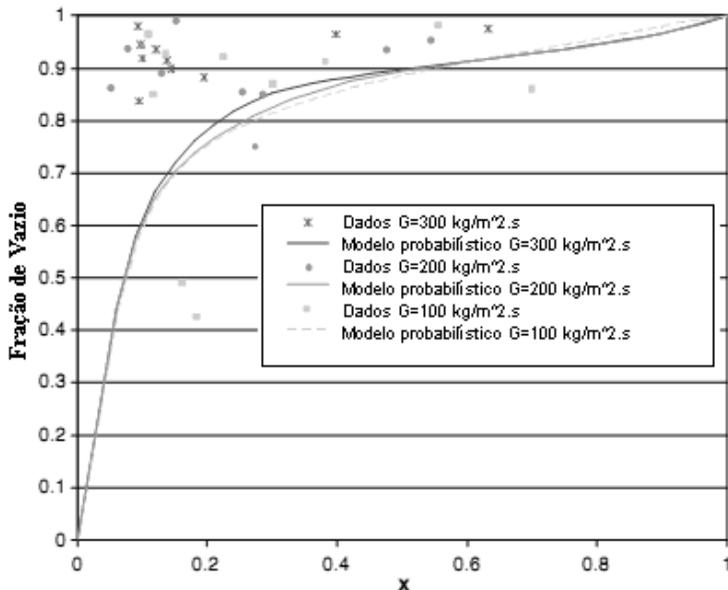


Figura 2.14: Correlações e dados experimentais para a fração de vazio em função do título,  $x$ , do R410a, a 10 °C, conforme Jassim *et. al* (2006).

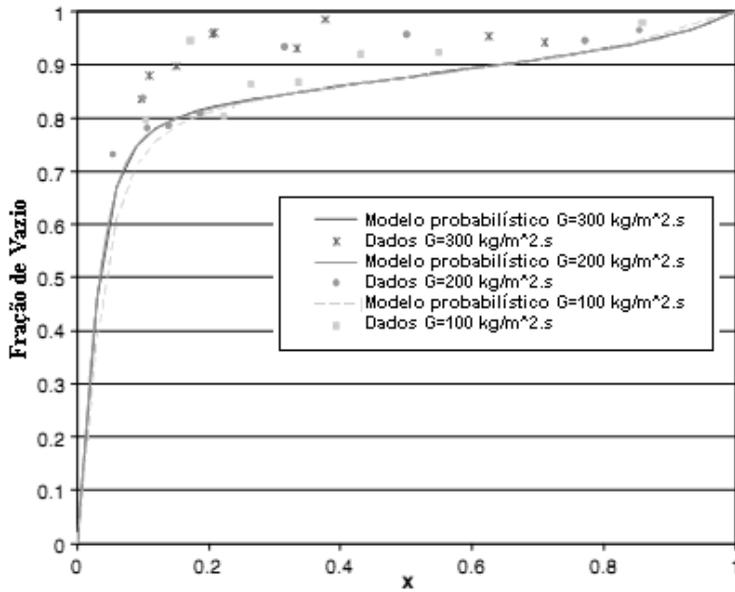


Figura 2.15: Correlações e dados experimentais para a fração de vazio em função do título,  $x$ , do R134a, a  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , conforme Jassim *et. al* (2006).

## CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a bancada experimental e seus principais subsistemas, assim como o detalhamento da instrumentação utilizada. Serão apresentados os resultados da calibração de instrumentos de medição e também a análise do circuito eletrônico dos sensores de fração de vazio.

### 3.1. Descrição geral

A bancada experimental utilizada permite reproduzir o escoamento bifásico com as proporções de água e ar desejadas e, assim, propicia a operação e análise de diferentes regimes de escoamento bifásico.

Nas Figuras. 3.1 e 3.2 são apresentados um esquema geral e uma fotografia da bancada.

O fluxo de água faz-se através de uma bomba centrífuga, marca SCHNEIDER série BD 92S-GB, de 2,0 *cv*, com capacidade de 15  $m^3/h$  a 30 *mca*. A bomba faz a sucção da água a partir do reservatório de água com volume aproximado de 6 *litros*. Um inversor de frequência, marca WEG modelo ML-4.0/1AC.200-240 permite a regulagem da vazão de água através do controle das rotações da bomba. Para a medição da vazão de água,  $Q_l$ , um rotâmetro marca Wasser foi utilizado. O dispositivo é calibrado para uso de água a 15°C, e foram realizados testes com uma amplitude de vazão de água entre 0,1 até 10,0 *litros/h*.

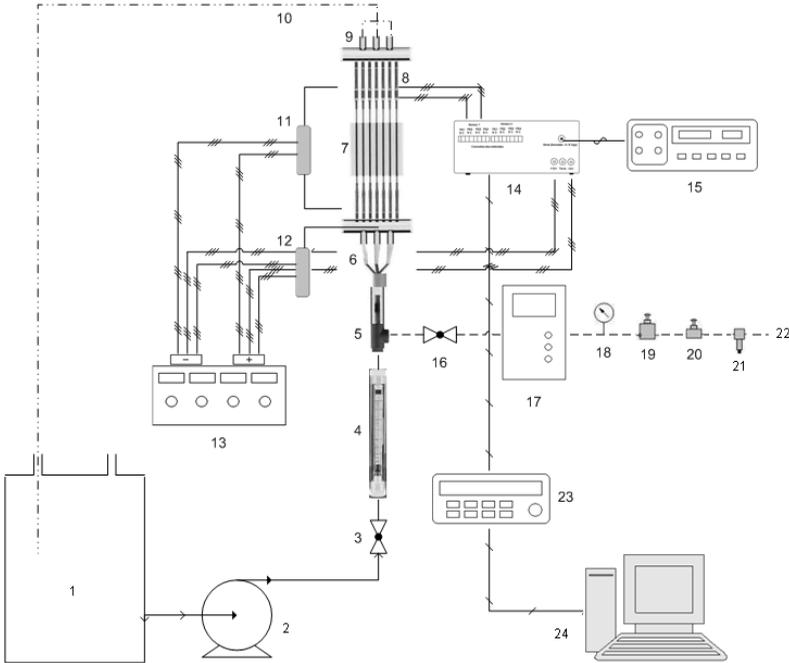


Figura 3.1 – Configuração experimental: 1 – reservatório de água; 2 – bomba centrífuga; 3 – válvula reguladora de vazão de água; 4 – rotâmetro de água; 5 – misturador; 6 – distribuidor de entrada; 7 – micro-canais em paralelo; 8 – sensores de impedância elétrica; 9 – distribuidor de saída; 10 – escoamento bifásico; 11 – transdutor de pressão diferencial; 12 – transdutor de pressão absoluta; 13 – fonte AC/DC; 14 – circuito eletrônico; 15 – gerador de função senoidal; 16 – válvula reguladora de vazão de ar; 17 – medidor de vazão de ar; 18 – manômetro; 19 – válvula reguladora de pressão; 20 – válvula reguladora de vazão; 21 – filtro de ar; 22 – linha de ar-comprimado; 23 – sistema de aquisição de dados; 24 – computador.

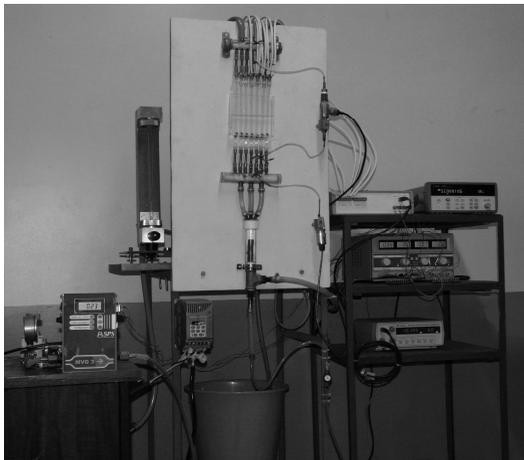


Figura 3.2 – Fotografia geral da bancada experimental.

Ar da linha pressurizada, com pressões variando de 1 a 2,6 *bar*, é misturado à água proveniente do reservatório de maneira a compor um escoamento bifásico gás-líquido, onde os diferentes regimes de escoamento são determinados pelas vazões tanto do gás como do líquido. O misturador de fases onde a água e o gás pressurizado se encontram é ilustrado na Figura 3.3. É constituído de um tubo com diâmetro interno de 10 *mm* com dezoito furos de 1 *mm* de diâmetro na lateral. O misturador é inserido concentricamente em um tubo de 20 *mm* de diâmetro interno por onde escoa a água.



Figura 3.3 – Misturador de fases.

### 3.2. Os canais

São empregados sete micro-canais de vidro, cilíndricos, dispostos paralelamente na vertical, com seção transversal circular e cujos diâmetros nominais interno e externo são iguais a  $1,22\text{ mm}$  e  $4\text{ mm}$ , respectivamente.

As tomadas de pressão entre os canais são feitas através de tubos de cobre com diâmetro nominal de  $1\text{ mm}$  e juntos aos micro-canais em pontos específicos ( P1, P2, P3 e P4), conforme mostrado na Figura. 3.4.

Os micro-canais ligam-se aos dutos de entrada e saída através de manifolds (distribuidores) de geometria cilíndrica e fabricados em acrílico.

Os dutos de entrada e saída dos manifolds constituem-se de mangueiras de PVC com diâmetro interno de  $12,7\text{ mm}$ .

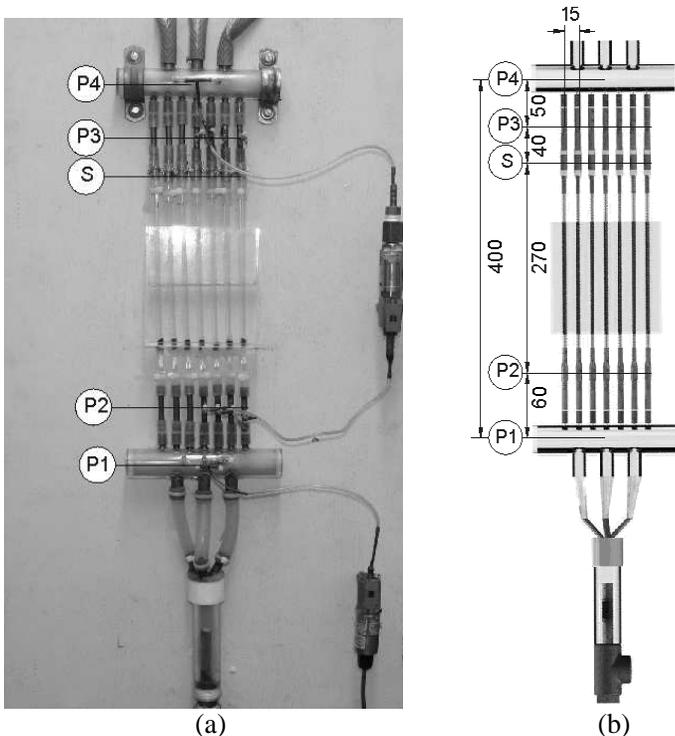


Figura 3.4 – Seção de teste, (a) fotografia e (b) esquema, medidas em *mm*.

Na Figura 3.5, é apresentada uma fotografia que mostra os detalhes entre as conexões do manifold inferior e os micro-canais.

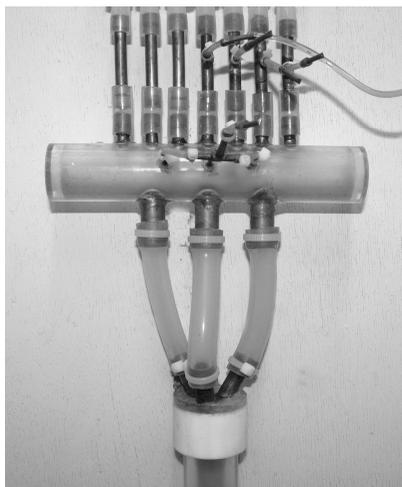


Figura 3.5 – Detalhes do manifold inferior, mostrando a conexão de entrada dos micro-canais.

Para o diâmetro interno dos canais, medições realizadas constataram tolerância de  $\pm 4 \mu\text{m}$  em relação ao diâmetro nominal de  $1,22 \text{ mm}$ , conforme verificado na Figura 3.6.

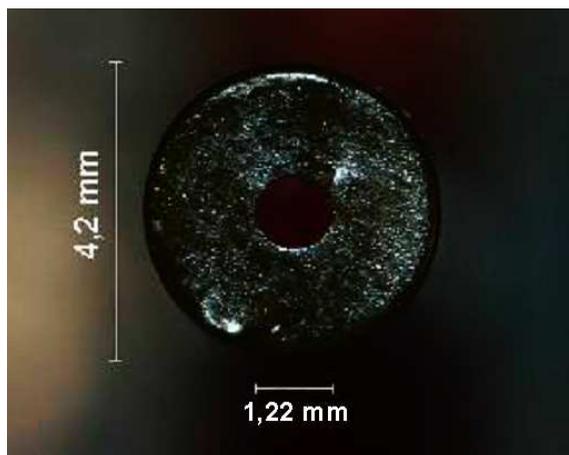


Figura 3.6 – Seção transversal com as dimensões do diâmetro interno e externo dos micro-canais.

### 3.3. Sensores e dispositivos de medição

Para medir a queda de pressão através dos canais, é utilizado um transdutor de pressão diferencial da marca OMEGA modelo PX821. Duas tomadas de pressão foram instaladas em cada manifold para medir a queda de pressão do escoamento em sua passagem pelos micro-canais. Da mesma forma cada canal apresenta duas tomadas de pressão ao longo de seu eixo para a medição individual das quedas de pressão dos micro-canais paralelos.

No centro do manifold de entrada, uma tomada de pressão permite medir a pressão absoluta do escoamento através de um transdutor de pressão absoluta da marca OMEGA, modelo PX302.

Os transdutores de pressão diferencial e absoluta, visualizados nas Figuras 3.7 (a) e 3.7 (b), operam na faixa de 0 a 3,4 bar com um sinal de saída variando de 0 a 100 mV. Segundo dados do fabricante, a incerteza máxima dos transdutores é 1,5% do valor medido de fundo de escala.



Figura 3.7 – Transdutores de pressão: (a) diferencial, (b) absoluta.

A vazão de água é medida com um rotâmetro da marca Wasser, visualizado na Figura 3.8, com incerteza máxima de 2% sobre o fundo de escala (FE).

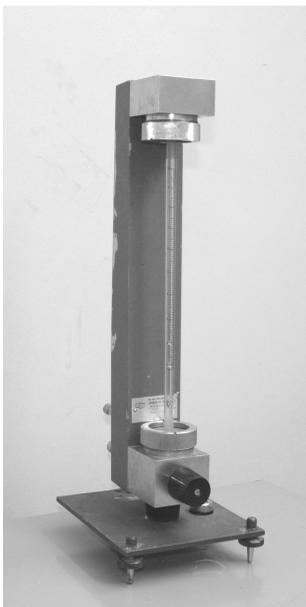


Figura 3.8 – Rotâmetro para medição da vazão de água.

Para as medições das vazões volumétricas de ar, foi utilizado um dispositivo eletrônico MVG-3, fabricado pelo LABSOLDA em Florianópolis, Brasil.

O dispositivo, visualizado na Figura 3.9, opera na faixa de vazão entre 0 a 20 *litros/minuto*, com um sinal de saída variando de 0 a 5 V, pressão máxima de trabalho de 3 *bar* e incerteza média de 5%.

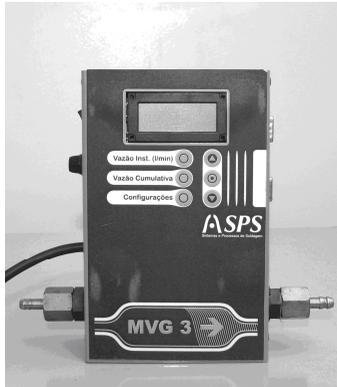


Figura 3.9 – Dispositivo de medição de vazão de ar, MVG-3.

A calibração do MVG-3 foi realizada no LABMETRO. A curva de calibração obtida (vazão volumétrica,  $Q$ , em litros/min e a tensão elétrica), é apresentada na Figura 3.10, juntamente com o polinômio ajustado pelo método dos mínimos quadrados.

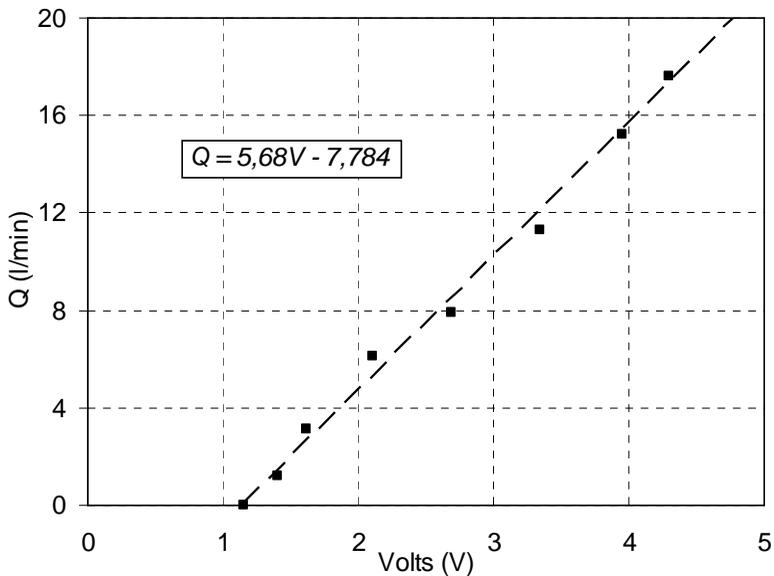


Figura 3.10 – Calibração do dispositivo de vazão de ar.

### 3.4. Sensor de fração de vazio

O sensor utilizado para medir a fração de vazio no presente trabalho constitui uma adaptação de um sistema que inicialmente foi desenvolvido para medir a fração de vazio em canais convencionais, utilizado por Oliveira (2007).

Para os micro-canais da bancada, foram configurados quatro sensores de impedância elétrica sendo que cada sensor é basicamente formado por um par de eletrodos fabricados em aço inoxidável, separados por uma fita isolante e um furo no centro ( $D = 1,0 \text{ mm}$ ) por onde passa o escoamento bifásico. Cada eletrodo apresenta  $15 \text{ mm}$  de comprimento conforme ilustrado na Figura 3.11.

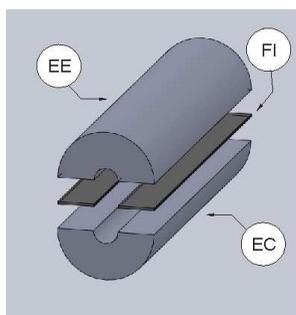


Figura 3.11 – Sensor de impedância elétrica: EE – eletrodo emissor, EC – eletrodo coletor, FI – fita de isolamento entre os eletrodos.

Segundo Rocha (2006), aplicando um sinal de tensão defasado de  $\pi$  para cada eletrodo diametralmente opostos cria-se um campo elétrico no interior dos sensores, conforme pode ser visualizado na Figura 3.12.

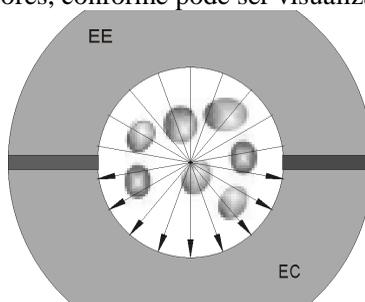


Figura 3.12 – Representação do campo elétrico entre os eletrodos e o escoamento bifásico.

Impedância é definida como a relação entre voltagem e corrente quando uma corrente alternada (AC) é aplicada em um meio. Através da modificação da frequência da corrente alternada, o método utilizado pode ser resistivo ou capacitivo ou ainda ambos.

Assim, a impedância medida depende da relação gás-líquido da mistura, portanto está diretamente relacionada com a composição de fases do escoamento.

Sob baixas frequências os efeitos resistivos dominam, por outro lado os efeitos capacitivos passam a dominar com o aumento significativo da frequência.

O sistema de medição é, portanto, constituído dos sensores feitos em aço inoxidável, o circuito eletrônico, uma fonte de tensão AC/DC e um gerador de função de onda senoidal. O circuito eletrônico de transdução dos sinais provenientes dos eletrodos foi projetado e construído pelo SISEA – Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos/Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da USP. Nas Figuras 3.13 e 3.14 é apresentado um esquema do circuito elétrico usado e um diagrama representativo, conforme Rocha (2006).

Para o caso dos sensores utilizados, o escoamento bifásico é mantido em contato direto com os sensores, optou-se então pelo uso do método resistivo. Neste trabalho o sinal de entrada do circuito eletrônico é de 15  $kHz$  e 6  $V_{pp}$ , sendo que para cada par de sensores este sinal é defasado e invertido. A seguir os chamados amplificadores de instrumentação que são ligados em série com eletrodos opostos, amplificam o sinal que posteriormente é retificado e filtrado. Na filtragem são criados o sinal instantâneo e o sinal médio, o primeiro através de um filtro passa baixa com frequências de 0,6 até 100  $Hz$ , e o segundo através de um filtro passa alta com frequência de 0,6  $Hz$ .

Assim os sinais instantâneos e médios são relacionados com a fração de vazio do escoamento bifásico que passa pelos micro-canais. Os sinais deverão variar conforme as diferentes configurações de escoamento. Um esquema representativo do circuito eletrônico referente ao sistema de medição de fração de vazio é apresentado no ANEXO IV.

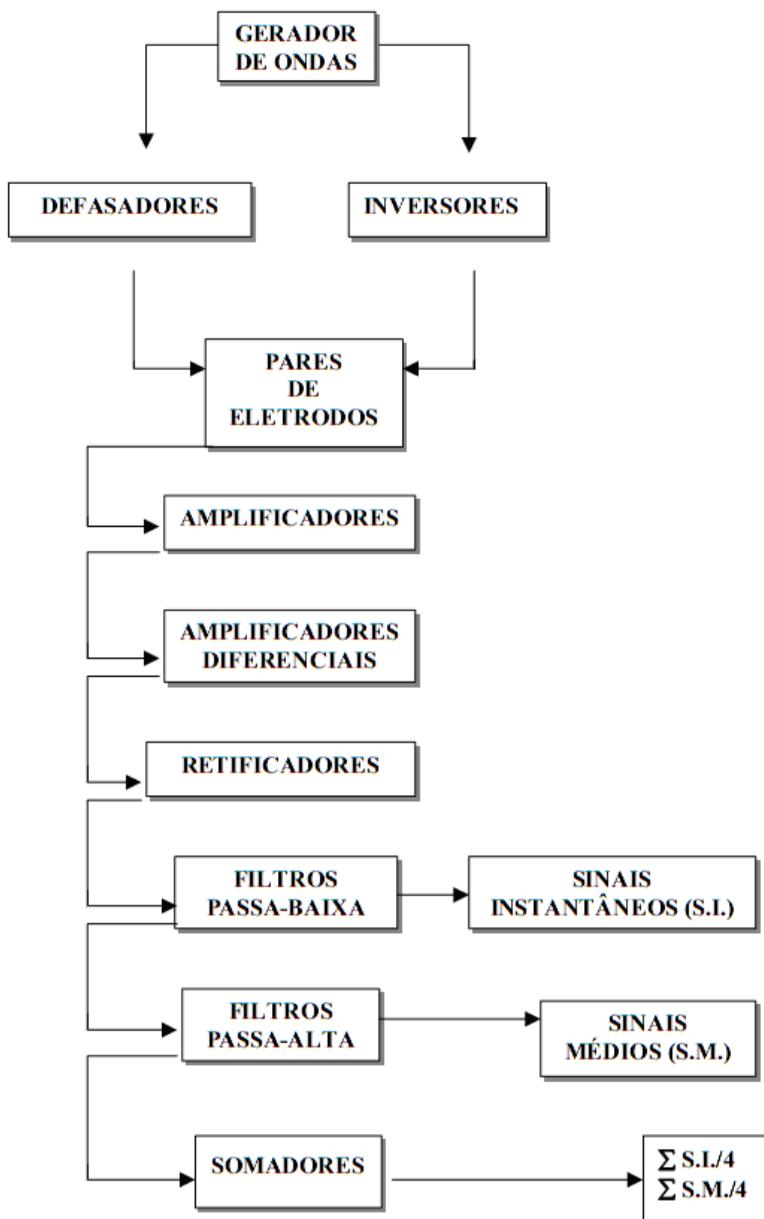


Figura 3.13 – Diagrama representativo do circuito eletrônico, Rocha (2006).

### 3.4.1. Modelo elétrico elementar

A Figura 3.14 representa o esquema do modelo elétrico básico, equivalente ao sistema de medição e o transdutor de impedância.

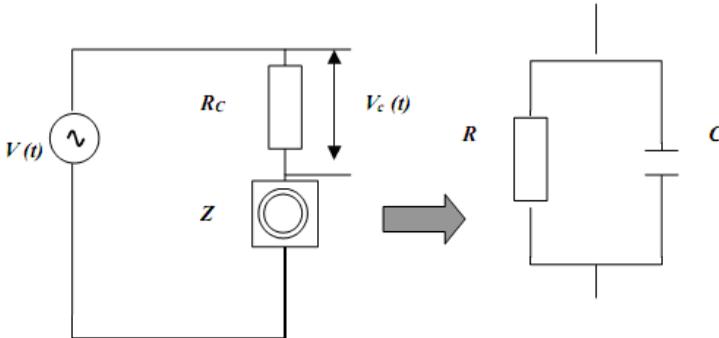


Figura 3.14– Esquema do circuito elétrico equivalente do transdutor de impedância circuito RC.

Definimos a impedância,  $Z$ , como a razão entre a tensão e a corrente elétrica ( $V / I$ ) quando aplicamos uma corrente alternada em um meio.

Assim,  $Z$  irá variar conforme a tensão aplicada e será equivalente à impedância do meio bifásico onde são realizadas as medições. A impedância, por sua vez, pode ser considerada como o resultado de dois efeitos elétricos paralelos: a resistância e a capacitância do meio bifásico.

Na Figura 3.14, a impedância,  $Z$ , do circuito RC em paralelo, está ligada em série com uma pequena resistência,  $R_c$ , e uma fonte de tensão  $V(t)$ .

Conforme a frequência da fonte de excitação estabelecida, poderão predominar os efeitos resistivos ou capacitivos.

O efeito resistivo será dominante, caso a eq. (3.1) seja satisfeita

$$(\omega C)^2 \gg \left(\frac{1}{R}\right)^2 \quad (3.1)$$

onde  $\omega$ , é a frequência angular do sinal.

O produto RC é definido como a razão entre a constante dielétrica,  $\epsilon$ , e a condutividade elétrica,  $K$ :

$$RC = \frac{\epsilon}{K} \quad (3.2)$$

O circuito eletrônico fabricado no SISEA, por Rocha (2006), foi projetado para atuar no método resistivo, operando com frequências abaixo de 110 kHz. Acima deste valor, os efeitos capacitivos são mais pronunciados.

Como já foi mencionado nesta seção, a frequência utilizada é de 15 kHz o que satisfaz plenamente o uso do método resistivo e também anula efeitos indesejáveis da eletrólise na interface líquido-eletrodo, decorrentes de frequências de operações acima de 50 kHz.

Uma vez determinadas as configurações de alimentação do circuito, pode-se relacionar a queda de tensão na resistência de carga,  $V_c$ , com a impedância resistiva,  $Z$ , e a condutividade média,  $K$ , com o uso da equação:

$$N = \frac{K}{K_2} \approx \frac{V_m - V_2}{V_1 - V_2} \quad (3.3)$$

onde os subscritos, 1,2 e  $m$ , referem-se ao ar, água e valor medido do escoamento bifásico, respectivamente.

Esta normalização tem por finalidade atenuar as variações das propriedades físicas da água e do ar em virtude da presença de impurezas no escoamento e também para atenuar a influência da variação da temperatura durante os experimentos.

### **3.5. Aquisição de dados**

Para a aquisição dos dados é utilizado um sistema de aquisição de dados marca Agilent modelo 34970A, usado em combinação com o software Labview 6.1 em um computador. Através do Labview os dados obtidos são visualizados em várias interfaces e armazenados em arquivo com extensão *xls*.

Os dados armazenados são então tratados através dos softwares Excel 2003 e EES permitindo a criação dos gráficos representativos dos resultados.

## CAPÍTULO 4 - RESULTADOS PARA UM ÚNICO MICRO-CANAL

Neste capítulo são apresentados os resultados da queda de pressão em um único micro-canal para escoamentos monofásicos de ar e de água e bifásico adiabático água-ar, na direção vertical e em sentido ascendente.

Para os escoamentos monofásicos, fluxos mássicos de 50 até 2000  $kg/m^2s$  são operados para o escoamento de água e fluxos mássicos de 20 até 130  $kg/m^2s$  são utilizados no escoamento de ar.

Fluxos mássicos, variando de 70 a 2450  $kg/m^2s$  para a água e de 0 a 18  $kg/m^2s$  para o ar, são operados com o título de gás variando entre 0 a 20% para o escoamento bifásico.

As quedas de pressão na entrada e saída dos distribuidores de vazão são desprezadas, considerando somente a queda de pressão entre os pontos de entrada e saída do micro-canal (260 mm).

É realizada a análise gráfica dos valores experimentais da queda de pressão ao longo do micro-canal e sua comparação com os valores obtidos através das principais correlações para queda de pressão bifásica existentes na literatura.

A seguir, é realizada uma análise dos diferentes regimes de escoamento encontrados em laboratório. Esta análise compara a visualização fotográfica dos escoamentos bifásicos testados com mapas de padrões que classificam o tipo de escoamento conforme as velocidades superficiais de cada fase.

Neste capítulo ainda é abordada a análise do sinal de impedância elétrica, no modo resistivo, emitido pelos sensores de fração de vazio e sua comparação com algumas correlações envolvendo o título de gás. A finalidade desta comparação é avaliar se os dados captados pelo sensor estão de acordo com a fração de vazio do escoamento.

Por fim, é feita uma análise geral dos procedimentos realizados.

#### 4.1. Queda de pressão monofásica para um micro-canal

Em uma primeira análise sobre escoamentos em micro-canais, cabe o estudo do coeficiente de atrito monofásico e sua relação com o número de Poiseuille,  $Po$ , para o caso de escoamento laminar. No caso do escoamento turbulento o coeficiente de atrito é obtido satisfatoriamente através da correlação de Blasius, eq. (2.22).

A Figura 4.1 ilustra o coeficiente de atrito experimental e teórico para a água com pressão manométrica de  $1\text{bar}$  e temperatura de  $25^\circ\text{C}$ .

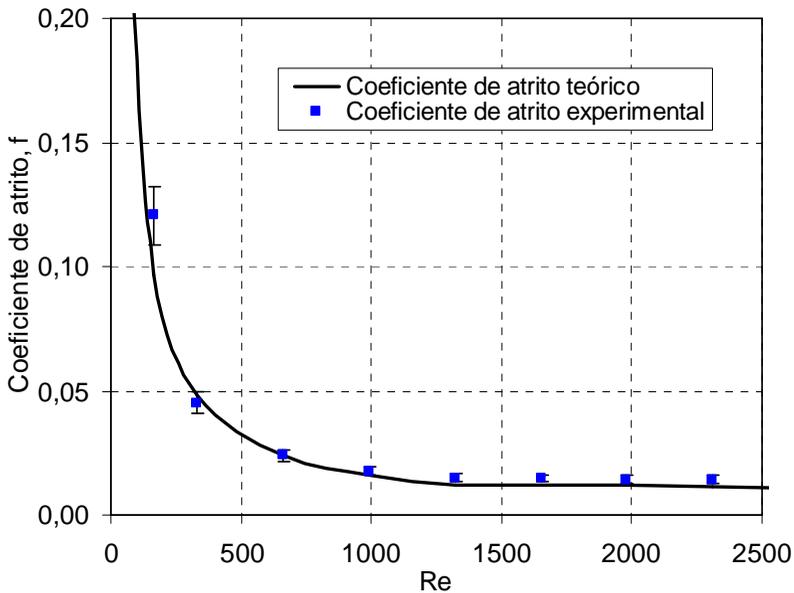


Figura 4.1 – Comparação entre os resultados experimentais para o escoamento laminar e o coeficiente de atrito teórico da água.

Os resultados experimentais para o coeficiente de atrito obtidos a partir da queda de pressão apresentam boa concordância com a teoria do coeficiente de atrito de Poiseuille, com desvios de 5 a 10% exceto para baixos valores do número de Reynolds ( $Re = 160$ ) quando as irregularidades nos dutos de entrada e saída dos canais geram efeitos significantes, neste caso os desvios chegam a 17%. Para os valores do número de Reynolds acima de 300, os valores medidos encontraram-se em conformidade com a correlação de Blasius, com desvios menores que 4%.

Na Figura 4.2, são apresentados os resultados da queda de pressão para o caso da água.

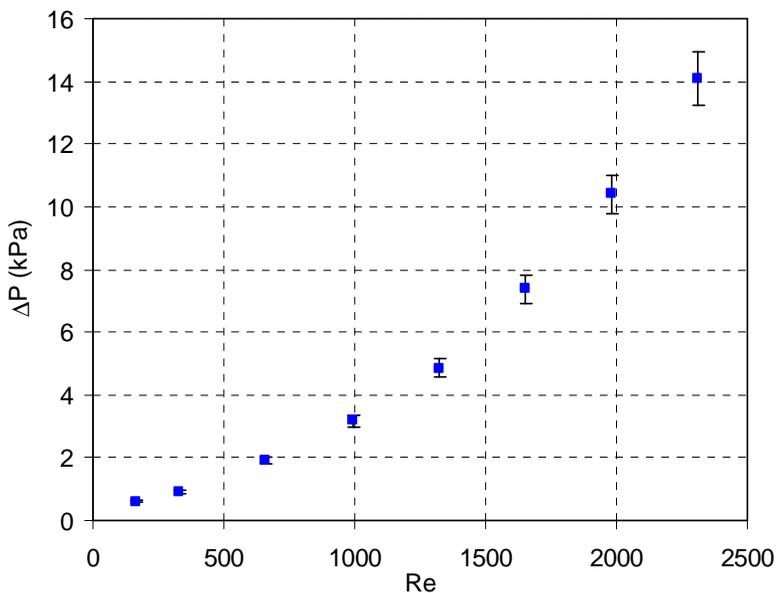


Figura 4.2 – Queda de pressão para o escoamento de água.

A mesma análise realizada para o coeficiente de atrito da água é realizada para o ar, conforme as Figuras. 4.3 e 4.4.

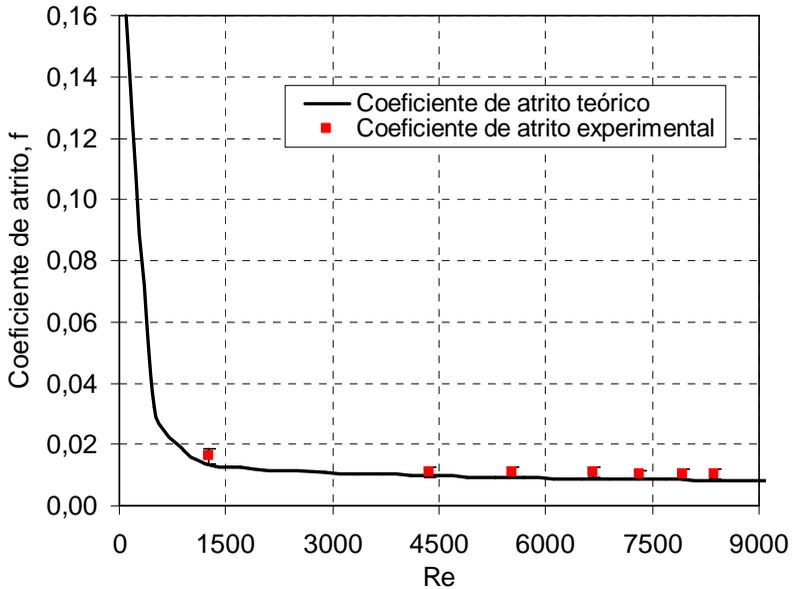


Figura 4.3 – Comparação entre os resultados experimentais e o coeficiente de atrito teórico do ar.

Nota-se uma flutuação de 15% para os valores calculados do ar no regime laminar com relação aos valores teóricos e valores que oscilam até 13 % para o regime turbulento

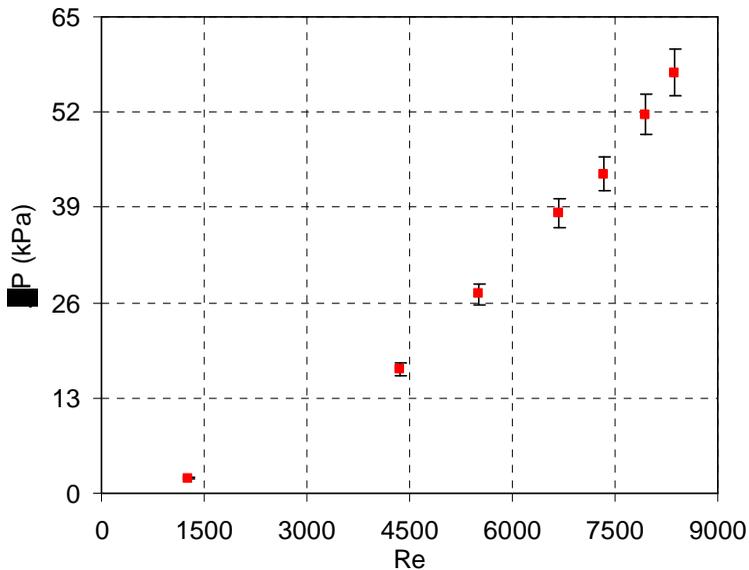


Figura 4.4 – Queda de pressão para o escoamento de ar.

## 4.2. Queda de pressão bifásica para um micro-canal

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais da queda de pressão por atrito ao longo do micro-canal e a comparação dos dados obtidos com as principais correlações para escoamento bifásico.

Os testes realizados incluem valores para o número de Reynolds da fase líquida,  $Re_l$ , na faixa de 90 até 3300 com título de gás,  $x$ , variando de 0 até 0,2.

Os testes foram realizados na temperatura de 25°C e a pressão manométrica do escoamento apresentou variação de 1 a 2,6 *bar*. Os valores de RMS para a incerteza de medição do transdutor da queda de pressão é de  $\pm 0,63\%$  conforme pode ser verificado no ANEXO III

Excepcionalmente nas Figuras 4.5 e 4.6, os resultados previstos pelas correlações coincidem em razão do baixo título de gás ( $x \rightarrow 0$ ). Portanto, as correlações refletem, neste caso particular, a queda de pressão para um escoamento praticamente monofásico. Já as Figuras 4.7 a 4.13, refletem situações onde a presença de ar assume valores de título de gás que atingem até 20%.

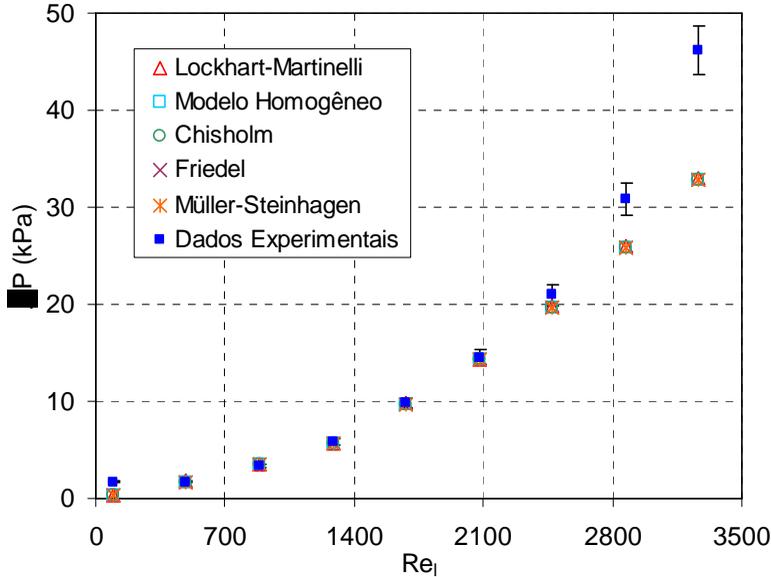


Figura 4.5 – Queda de pressão bifásica,  $j_g = 0,008 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 0,01 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

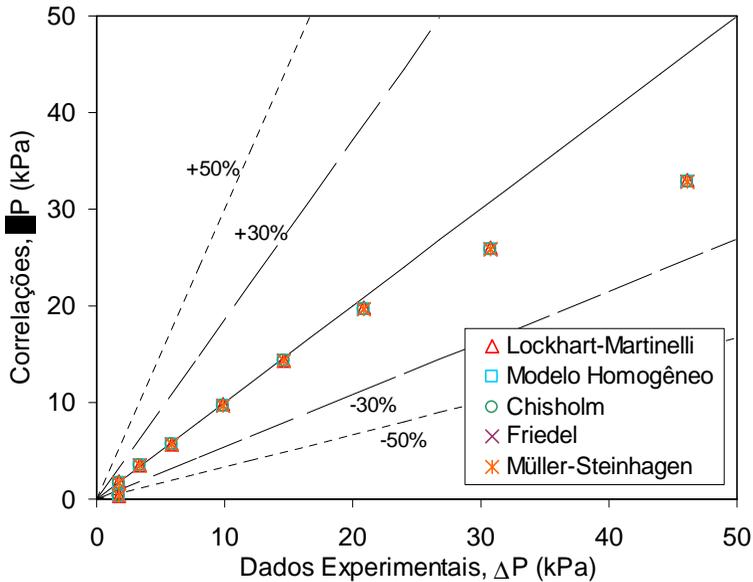


Figura 4.6 – Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados,  $j_g = 0,008 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 0,01 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

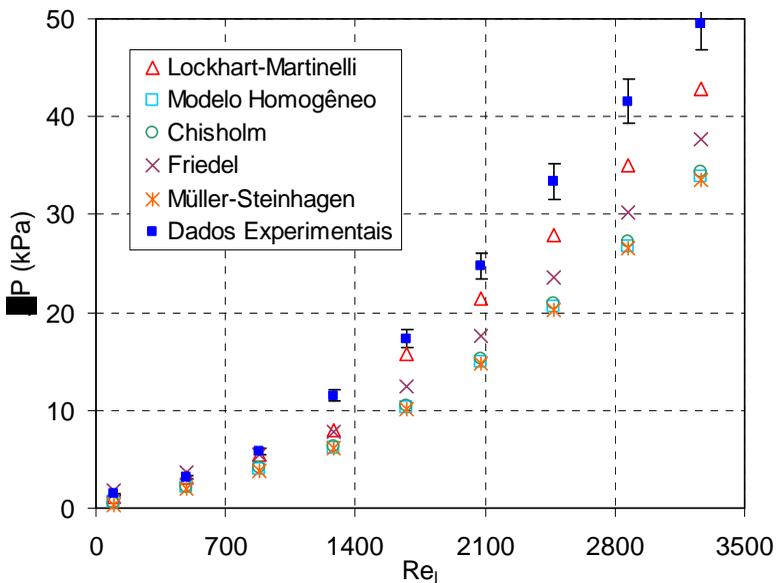


Figura 4.7 – Queda de pressão bifásica,  $j_g = 0,11 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 0,1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

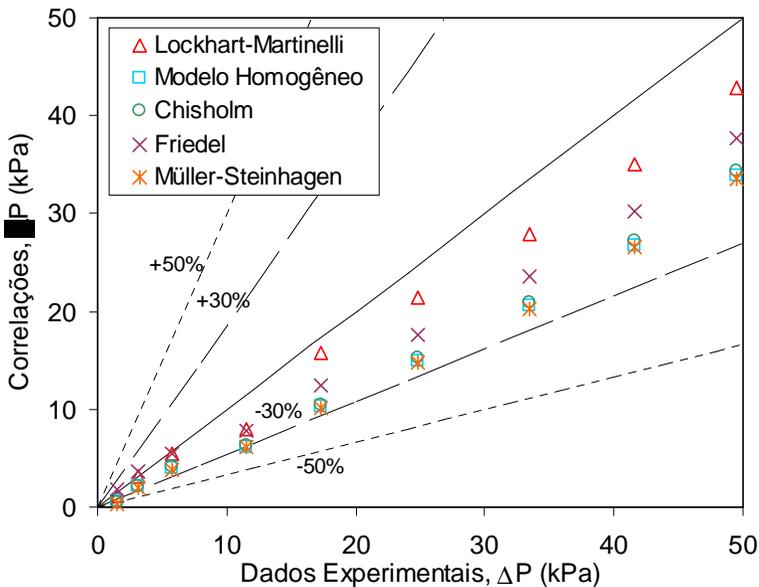


Figura 4.8 – Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados,  $j_g = 0,11 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 0,1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

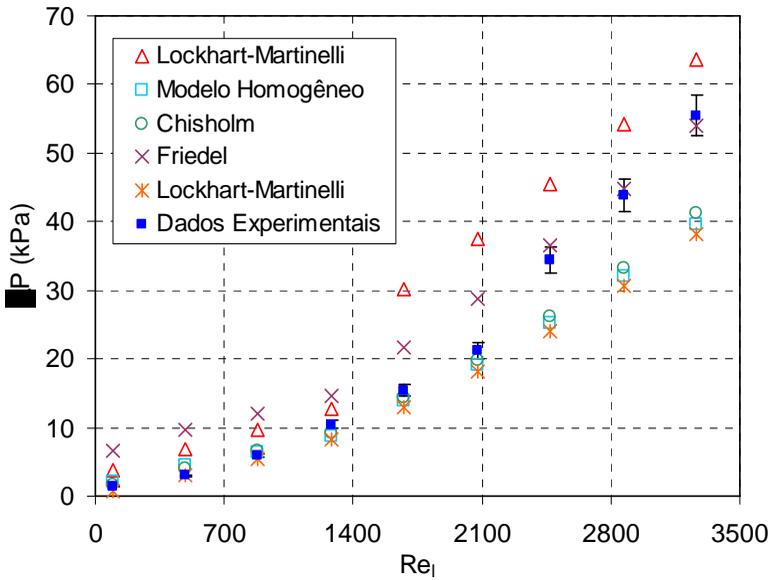


Figura 4.9 – Queda de pressão bifásica,  $j_g = 0,8 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

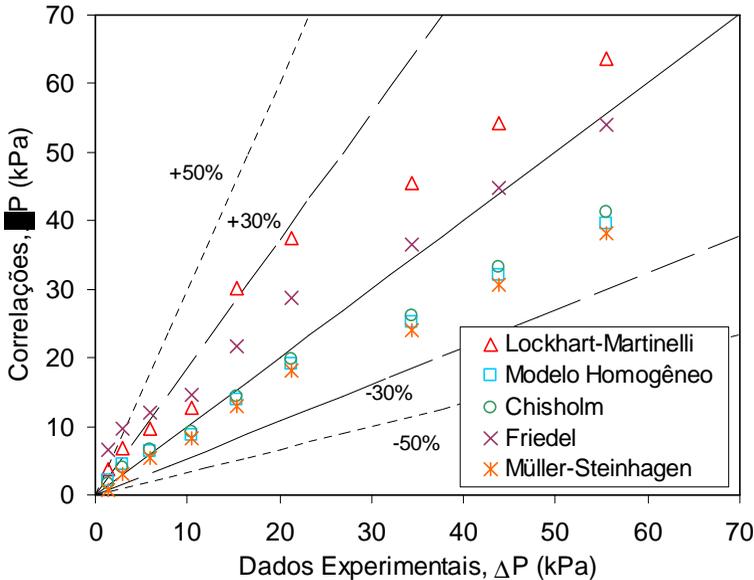


Figura 4.10 – Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados,  $j_g = 0,8 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

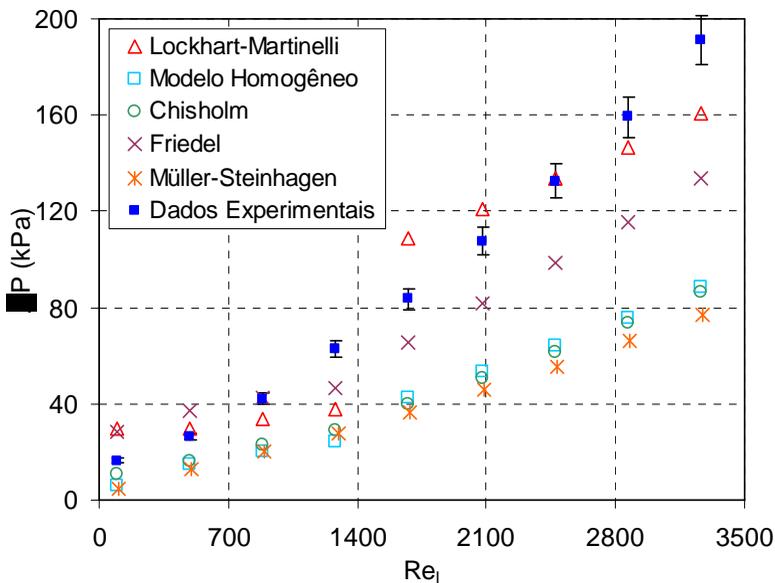


Figura 4.11 – Queda de pressão bifásica,  $j_g = 6,6 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 8 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

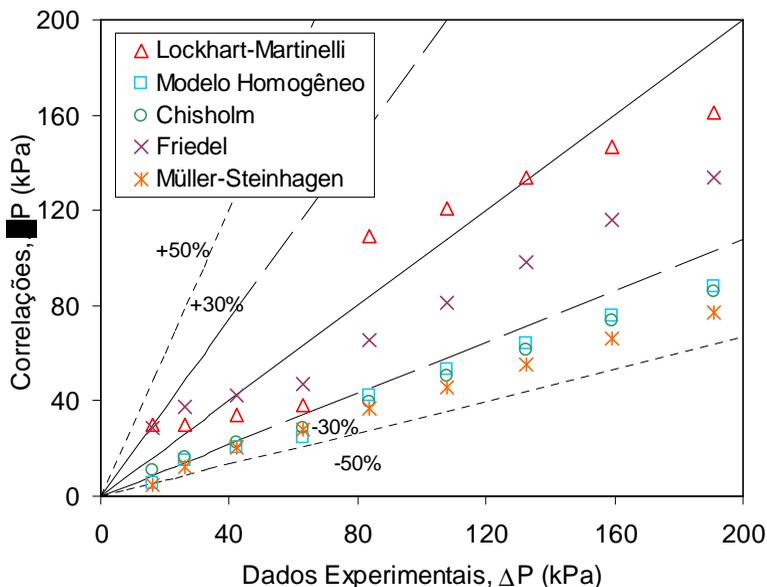


Figura 4.12 – Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados,  $j_g = 6,6 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 8 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

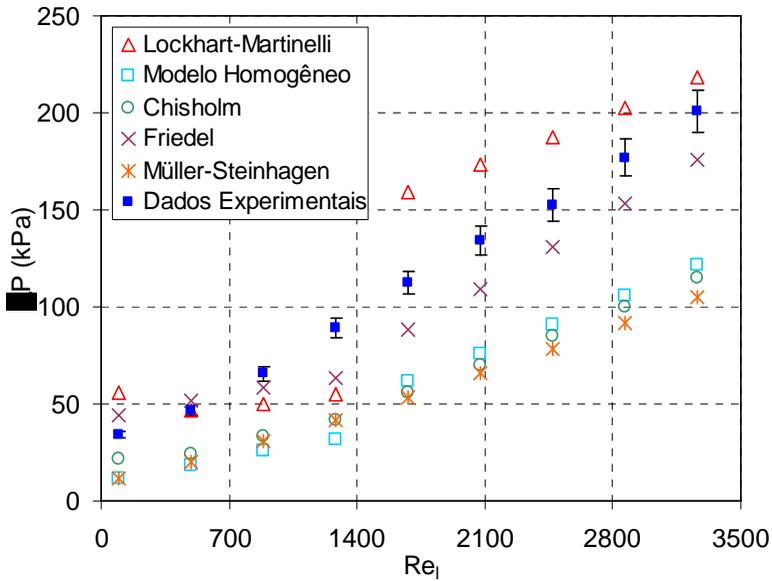


Figura 4.13 – Queda de pressão bifásica,  $j_g = 11 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 13 \text{ kg/m}^2\text{s}$

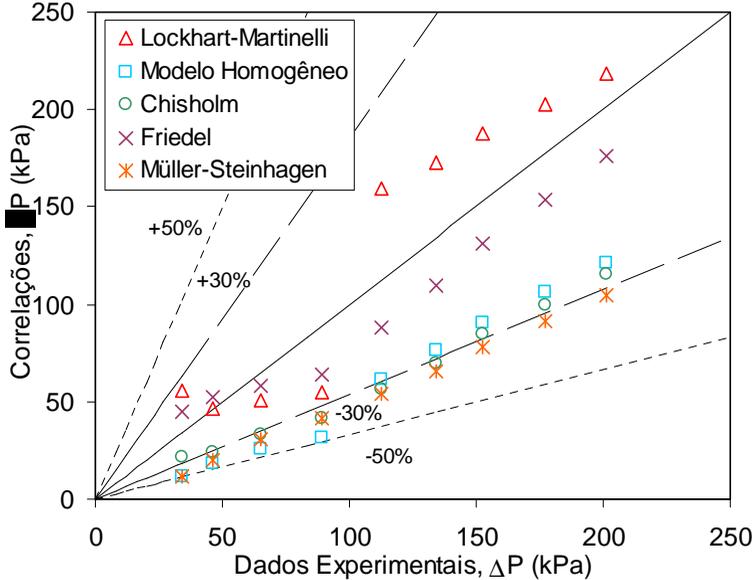


Figura 4.14 – Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados,  $j_g = 11 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 13 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

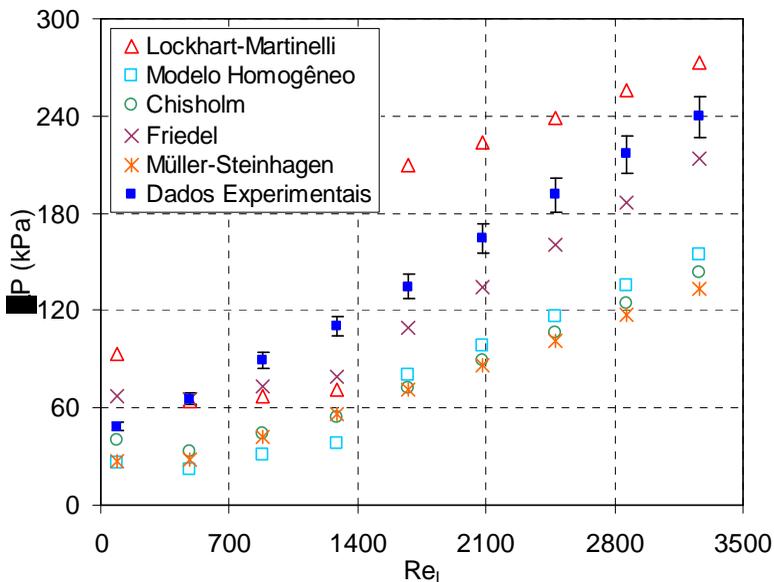


Figura 4.15 – Queda de pressão bifásica,  $j_g = 15 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 18 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

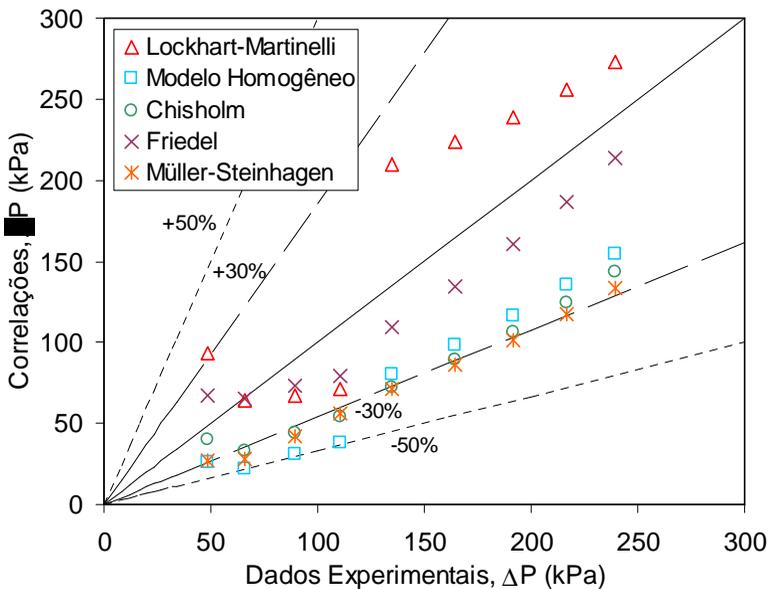


Figura 4.16 – Comparação da queda de pressão medida e os valores calculados,  $j_g = 15 \text{ m/s}$ ,  $G_g = 18 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

Tabela 4.1 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G_g = 0,1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo	Fração dos dados com erro relativo	RMS (%)
	de $\pm 30\%$ (%)	de $\pm 50\%$ (%)	
Lockhart & Martinelli	100	100	16,9
Homogêneo	88,9	100	39,1
Chisholm	100	100	39,7
Friedel	100	100	26,1
Muller-Steinhagen	77,8	100	44,6

Tabela 4.2 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G_g = 1 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo	Fração dos dados com erro relativo	RMS (%)
	de $\pm 30\%$ (%)	de $\pm 50\%$ (%)	
Lockhart & Martinelli	66,7	100	86,6
Homogêneo	100	100	29,7
Chisholm	100	100	20,1
Friedel	66,7	77,8	147,8
Muller-Steinhagen	100	100	27,3

Tabela 4.3 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G_g = 8 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo	Fração dos dados com erro relativo	RMS (%)
	de $\pm 30\%$ (%)	de $\pm 50\%$ (%)	
Lockhart & Martinelli	100	100	33,7
Homogêneo	11,1	100	53,5
Chisholm	33,3	100	49,3
Friedel	100	100	35,8
Muller-Steinhagen	0	100	58,3

Tabela 4.4 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G_g = 13 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo	Fração dos dados com erro relativo	RMS (%)
	de $\pm 30\%$ (%)	de $\pm 50\%$ (%)	
Lockhart & Martinelli	100	100	32,4
Homogêneo	55,6	100	52,2
Chisholm	44,4	100	46,4
Friedel	100	100	19,1
Muller-Steinhagen	0	100	53,2

Tabela 4.5 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G_g = 18 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo	Fração dos dados com erro relativo	RMS (%)
	de $\pm 30\%$ (%)	de $\pm 50\%$ (%)	
Lockhart & Martinelli	88,9	100	42,2
Homogêneo	55,6	100	50,3
Chisholm	66,7	100	44,1
Friedel	100	100	21,1
Muller-Steinhagen	44,4	100	48,4

### 4.3. Análise dos diferentes regimes de escoamento

#### 4.3.1. Critério para transição dos regimes de escoamento

Durante os ensaios realizados em laboratório, foi verificada a ocorrência dos principais regimes de escoamento bifásico (borbulhado, pistonado, agitado e anular) para os intervalos estudados. Da mesma forma, regimes de escoamento transitórios estiveram presentes.

O escoamento bifásico foi obtido a partir da mistura de líquido e gás através do misturador. Uma vez que o sistema é adiabático, a concentração das fases líquida e gasosa depende exclusivamente do fornecimento de água e ar através da bomba e da linha externa de pressurização.

Para a predição do tipo de regime de uma dada configuração de escoamento bifásico, são comumente usados mapas que estabelecem critérios para transição dos regimes de escoamento.

Em se tratando de escoamento adiabático, normalmente os eixos x e y destes mapas são representados pelas velocidades superficiais do líquido,  $j_l$  e do gás,  $j_g$ , respectivamente.

Assim, foram testadas para um micro-canal várias configurações de escoamento bifásico com diferentes vazões de líquido e gás,  $Q_l$  e  $Q_g$ . As diferentes configurações de escoamento estão representadas no mapa de padrões de Mishima e Ishii (1983), conforme indicado na Figura 4.17.

A escolha deste mapa de padrões deve-se a este ser um mapa de uso exclusivo para canais com diâmetros hidráulicos reduzidos, onde

Mishima e Ishii (1983) revelam ter obtido resultados satisfatórios para canais com diâmetro hidráulicos de 1,04 mm. Para maiores detalhes, consultar o ANEXO I, onde se encontra o equacionamento referente às linhas de transição dos regimes de escoamento.

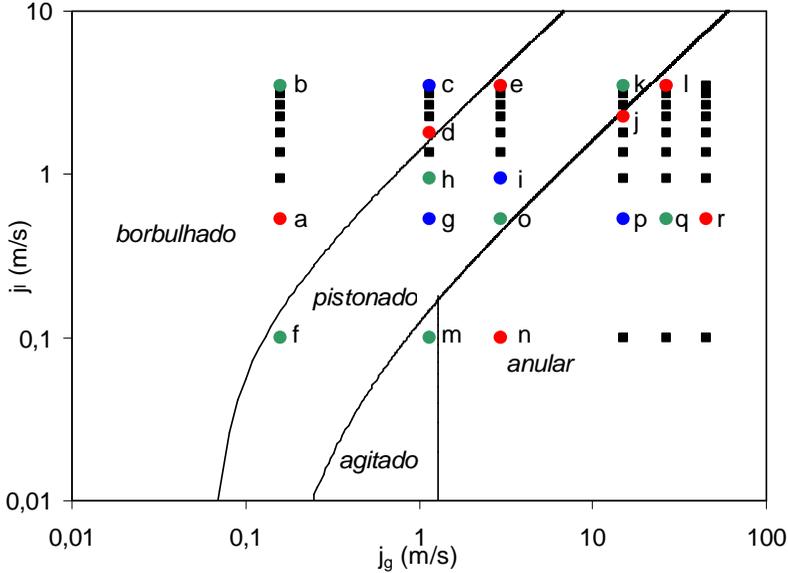


Figura 4.17 – Pontos experimentais sobre o mapa de padrões de Mishima e Ishii (1983).

### 4.3.2. Visualizações

Para melhor relacionar os regimes de escoamento bifásico com o mapa de Mishima e Ishii (1983), faz-se necessária a análise visual das diferentes configurações de escoamento testadas. A partir das fotografias, a seguir, é feita a análise sobre os pontos experimentais e se os mesmos correspondem aos regimes de escoamento previstos pelo mapa de padrões.

Assim, foram tiradas fotografias do micro-canal abrangendo as vazões de líquido e gás nas quais foram realizados os experimentos.

Mesmo com pouca frequência, o regime agitado aparece em algumas situações de escoamento, surgindo mais frequentemente em transição, de forma intermitente, com o regime anular.

Os demais escoamentos ocorrem conforme o previsto, como pode ser comprovado nas Figuras 4.18, 4.19 e 4.20.

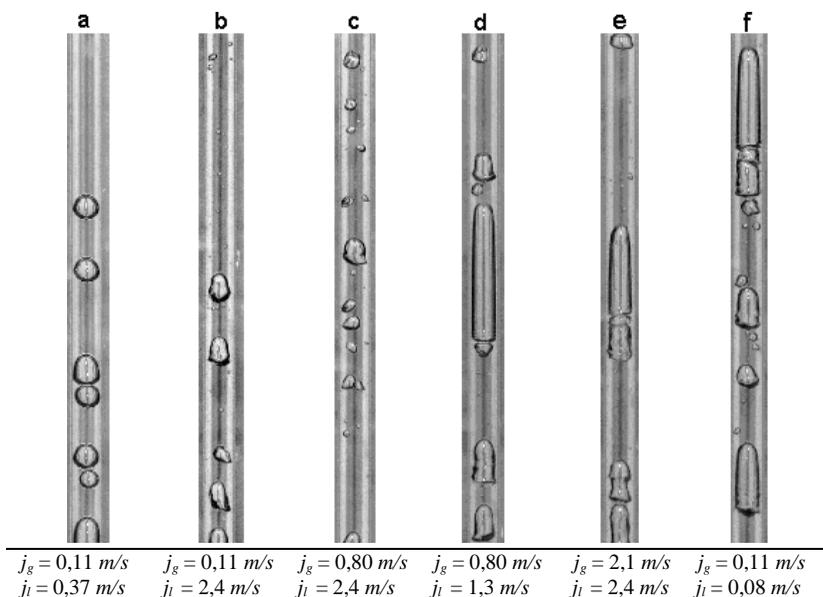


Figura 4.18 – Fotografias representativas dos escoamentos bifásicos, regimes borbulhado e borbulhado-pistonado.

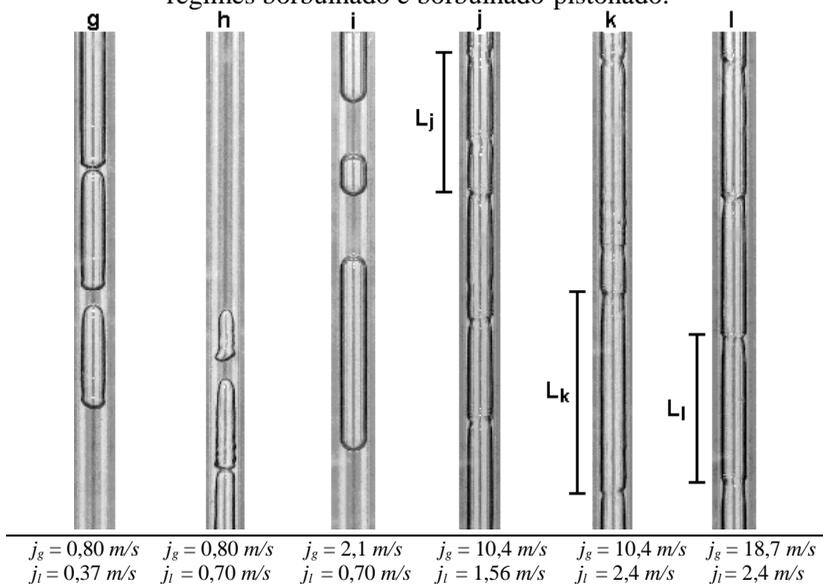


Figura 4.19 – Fotografias representativas dos escoamentos bifásicos, regimes pistonado e pistonado-anular.

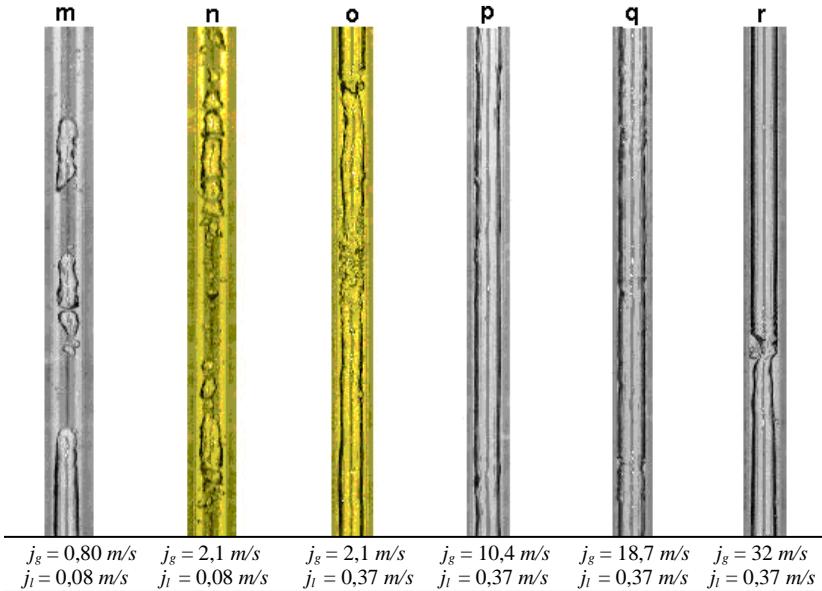


Figura 4.20 – Fotografias representativas dos escoamentos bifásicos, regimes agitado e anular.

As fotografias apresentaram coerência em relação aos dados esperados. Pequenas variações nos regimes de escoamento, aparecem para as configurações de escoamento referente ao regime agitado.

A análise fotográfica dos demais regimes comprova a previsão do mapa de padrões de escoamento. Com exceção dos casos apresentados na Figura 4.20n e 4.20o, onde era previsto, segundo o mapa de padrões, os regimes anular e pistonado, respectivamente, foram encontrados regimes transitórios entre o regime agitado e anular. Os demais regimes de escoamento verificados corresponderam às expectativas do mapa de Mishima & Ishii (1983).

Nas Figuras 4.18a, 4.18b e 4.18c, a análise fotográfica indica a presença do regime borbulhado. Verifica-se em 4.18a, a presença de bolhas com geometria esférica em função da baixa velocidade superficial da água nesta configuração ( $j_l = 0,37 \text{ m/s}$ ) ao passo que com o aumento da velocidade superficial da água nas Figuras 4.18b e 4.18c ( $j_l = 2,4 \text{ m/s}$ ) as bolhas não mais apresentam uma geometria definida, aparecendo de diversos tamanhos e formatos. Nas Figuras 4.18d e 4.18e são exemplos de escoamento borbulhado com bolhas pistonadas que indicam o

início da transição para o escoamento pistonado. Já na Figura 4.18f a baixa velocidade superficial do ar e da água ( $j_g = 0,11 \text{ m/s}$  e  $j_l = 0,08 \text{ m/s}$ ) confirma a presença de regime de escoamento pistonado conforme previsto pelo mapa de padrões.

A seguir, as Figuras 4.19g, 4.19h e 4.19i são visualizações típicas de escoamento pistonado com a presença de bolhas de Taylor bem definidas (corpo cilíndrico e nariz esférico).

Por último, nas Figuras 4.19j, 4.19k e 4.19l, com o aumento da velocidade superficial do ar ( $j_g = 10,4 \text{ m/s}$  e  $j_g = 18,7 \text{ m/s}$ ), o regime de escoamento existente é o pistonado-anular. As fotografias revelam a presença de anéis no intervalo de distâncias  $L_j$ ,  $L_k$  e  $L_l$  ao longo do escoamento e o padrão não é afetado por  $j_l$ . Aparentemente, o comprimento dos cilindros entre os anéis, conforme as Figuras 4.19k e 4.19l, diminui com o aumento de  $j_g$ .

As Figuras 4.21 e 4.22 nos informam o tipo de regime de escoamento observado através das imagens considerando a razão entre a queda de pressão dos modelos e a queda de pressão observada a partir dos dados experimentais com o aumento do número de Reynolds da fase líquida.

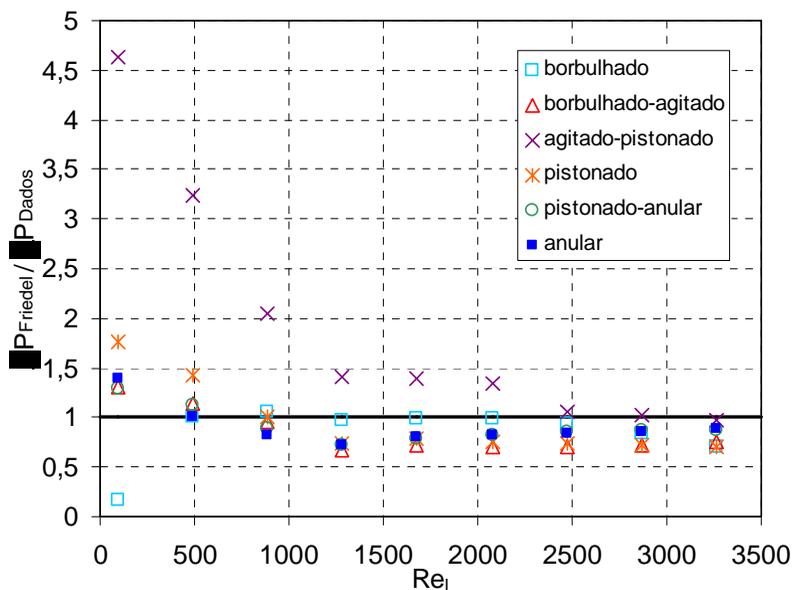


Figura 4.21 – Razão entre o modelo de Friedel e a queda de pressão medida.

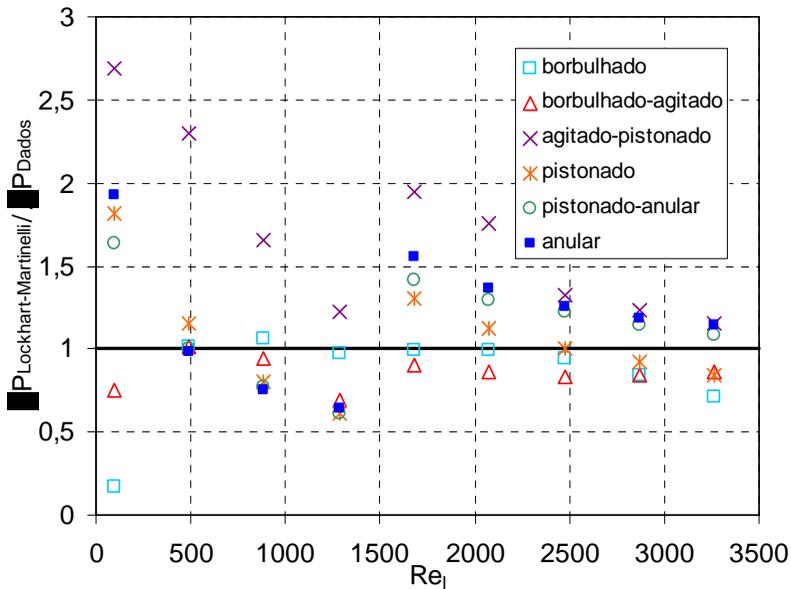


Figura 4.22 – Razão entre o modelo de Lockhart-Martinelli e a queda de pressão medida.

Tabela 4.6 – Estatísticas dos regimes de escoamento com relação à razão entre a queda de pressão prevista por Friedel e a queda de pressão dos dados experimentais.

Regime de Escoamento	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 50\%$ (%)	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 100\%$ (%)	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 150\%$ (%)	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 200\%$ (%)
Borbulhado	88,9	100	100	100
Borb/Agitado	100	100	100	100
Agit./Pistonado	66,7	77,8	77,8	77,8
Pistonado	88,9	100	100	100
Pist./Anular	100	100	100	100
Anular	100	100	100	100

Tabela 4.7 – Estatísticas dos regimes de escoamento com relação à razão entre a queda de pressão prevista por Lockhart-Martinelli e a queda de pressão dos dados experimentais.

Regime de Escoamento	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 50\%$ (%)	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 100\%$ (%)	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 150\%$ (%)	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 200\%$ (%)
Borbulhado	88,9	100	100	100
Borb/Agitado	100	100	100	100
Agit./Pistonado	44,4	77,8	88,9	100
Pistonado	88,9	100	100	100
Pist./Anular	88,9	100	100	100
Anular	77,8	100	100	100

A análise das Tabelas 4.6 e 4.7 sobre os dados e seus respectivos erros relativos levam a crer que a correlação de Lockhart-Martinelli, à exceção do regime agitado-pistonado, apresenta 100% de seus valores para queda de pressão na faixa de  $\pm 100\%$  de erro relativo aos valores experimentais para queda de pressão. Considerando o regime agitado-pistonado, o modelo teórico apresenta concordância com todos os valores experimentais somente na faixa de erro relativo de  $\pm 200\%$ . No caso do regime borbulhado-agitado, os valores previstos pelo modelo teórico estiveram em sua totalidade na faixa de  $\pm 50\%$  de erro relativo com os valores obtidos experimentalmente.

Considerando a correlação de Friedel, verifica-se a totalidade dos valores teóricos na faixa de  $\pm 50\%$  de erro relativo com relação aos valores experimentais considerando os regimes borbulhado-agitado, pistonado e pistonado-anular. Semelhantemente à correlação de Lockhart-Martinelli, as flutuações dos valores previstos pela correlação de Friedel com relação aos valores experimentais de queda de pressão para o regime agitado-pistonado apresentaram valores significativos de erro relativo. Nesta situação, verificou-se que 77,8% dos valores teóricos apresentaram erro relativo de  $\pm 200\%$  com relação aos valores experimentais.

#### 4.4. Avaliação da fração de vazio para um micro-canal

Para avaliar a fração de vazio nas diferentes configurações de escoamento testadas, envolvendo diferentes regimes e velocidades superficiais das fases, foi utilizado o sensor de impedância operando no método resistivo.

A frequência de excitação do gerador de ondas foi de  $15kHz$ , ou seja, bem maior que a velocidade das bolhas no interior do micro-canal, pode-se assim, assumir que a medição é realizada em um sistema estático o que permite a utilização da eq. (2.13).

O sinal normalizado,  $N$ , obtido a partir da eq. (3.3), permite então a análise da fração de vazio existente nas diferentes configurações de escoamento bifásico.

Na falta de um método de calibração para um micro-canal, já que métodos como válvulas de fechamento rápido ou o método gravimétrico são de difícil aplicação para canais reduzidos em virtude das pequenas dimensões, optou-se por uma comparação entre o sinal normalizado,  $N$ , e correlações para a fração de vazio existentes na literatura.

A partir de valores do título de gás,  $x$  determinados em laboratório e os respectivos sinais normalizados,  $N$ , obtidos pelo aquisidor foram comparadas correlações para a fração de vazio a partir do título,  $x$  e sinal normalizado,  $N$ .

Assim as correlações de Lockhart-Martinelli e Baroczy (eq. 2.57) são apresentadas nas Figuras 4.23 a 4.27 juntas com os respectivos sinais normalizados, dos sensores de impedância, obtidos a partir da variação do título de gás..

Nas Figuras. 4.23 e 4.24, os valores do título de gás variaram de  $x = 0 \rightarrow 0,03$  abrangendo configurações de escoamento onde o regime borbulhado e pistonado se faz presente.

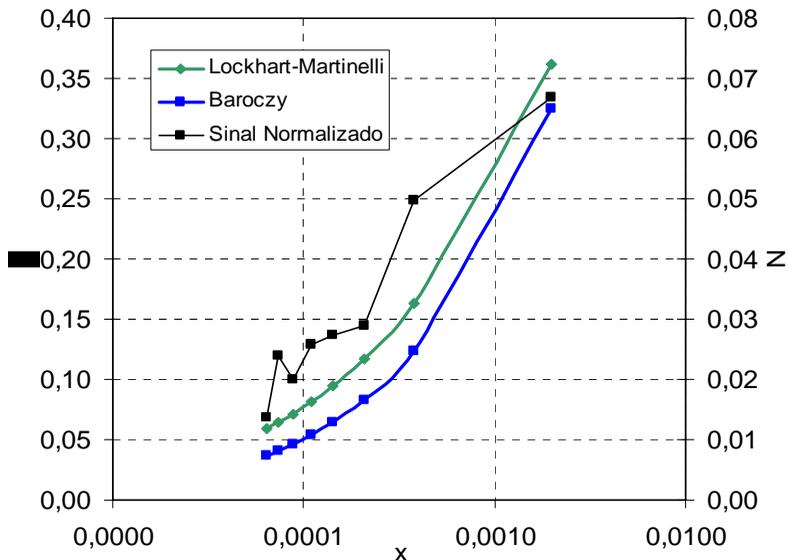


Figura 4.23 – Sinal normalizado dos sensores e correlações da fração de vazio para  $G_g = 0,1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

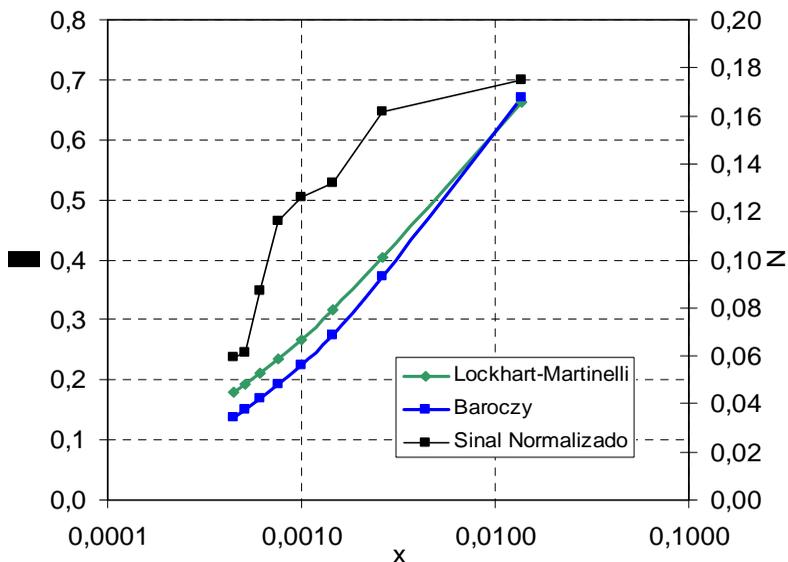


Figura 4.24 – Sinal normalizado dos sensores e correlações da fração de vazio para  $G_g = 1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

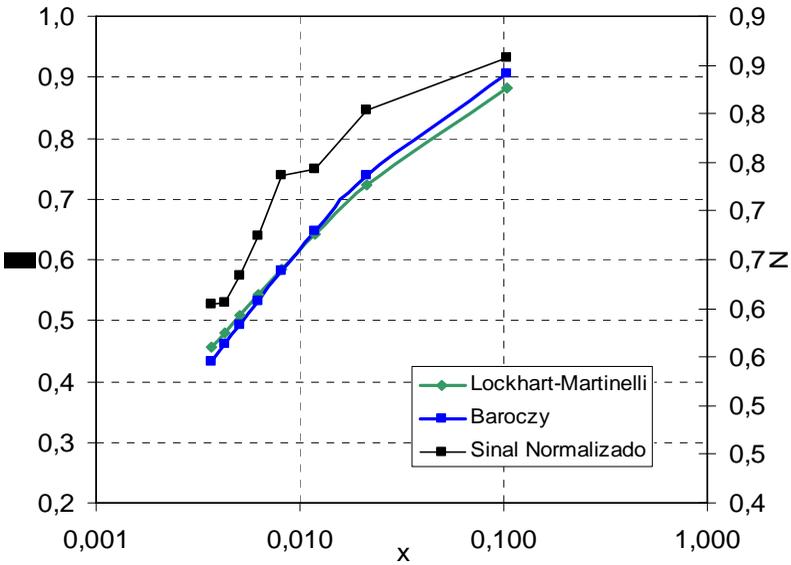


Figura 4.25 – Sinal normalizado dos sensores e correlações da fração de vazio para  $G_g = 8 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

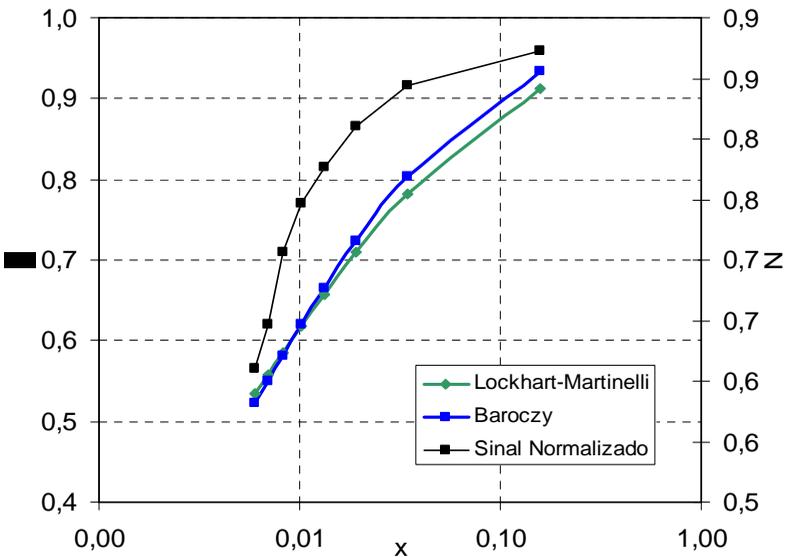


Figura 4.26 – Sinal normalizado dos sensores e correlações da fração de vazio para  $G_g = 13 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$ .

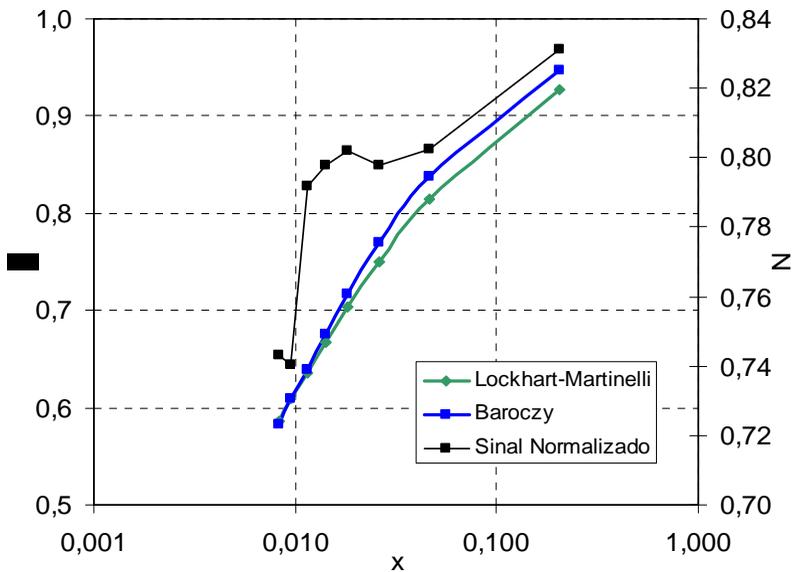
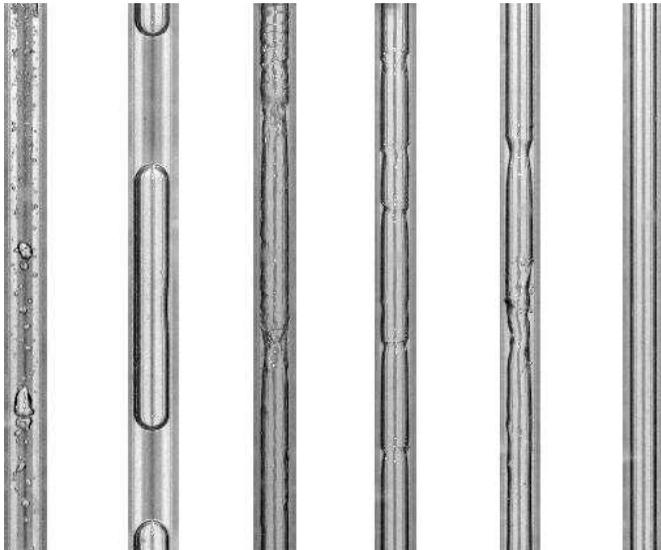


Figura 4.27 – Sinal normalizado dos sensores e correlações da fração de vazio para  $G_g = 18 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Conforme o título vai aumentando (Figuras 4.25, 4.26 e 4.27) o escoamento bifásico assume configurações onde prepondera a ocorrência dos regimes pistonado-agitado, pistonado-anular e anular.

As fotografias da Figura 4.28 representam os regimes de escoamento obtidos nos testes de fração de vazio.



$j_g$ (m/s)	0,02	0,11	0,80	6,70	10,8	15,1
$j_l$ (m/s)	1,25	0,06	0,36	0,65	0,36	1,54
$G_g$ (kg/m <sup>2</sup> /s)	0,01	0,1	1	8	13	18
Escoamento	Borbul.	Pistonado.	Pist./Agit.	Pist./Anul.	Anular	Anular

Figura 4.28 – Fotografias dos tipos de escoamento obtidas nos testes de fração de vazio.

A seguir são apresentadas as leituras dos sinais instantâneos obtidos pelos sensores de fração de vazio ao longo do tempo. Nas Figuras 4.29 a 4.31, a variação do sinal instantâneo com relação ao sinal médio dos sensores,  $V_{(t)} - V_m$ , é associada aos regimes de escoamento.

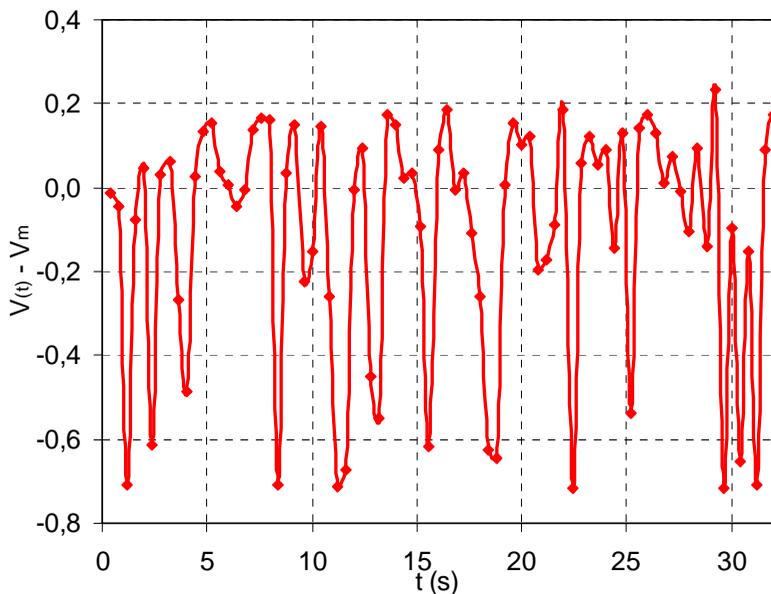


Figura 4.29 – Variações do sinal instantâneo para regime pistonado:  
 $j_g = 0,11 \text{ m/s}$  e  $j_l = 0,06 \text{ m/s}$

Na Figura 4.29, a variação da amplitude do sinal instantâneo foi maior que nas outras configurações testadas, uma vez que no regime pistonado ocorre a alternância das fases líquida e gasosa e estas escoam de maneira a preencher quase que totalmente a seção transversal do micro-canal no momento da leitura dos sensores. No caso do escoamento borbulhado (Figura 4.30), as variações do sinal instantâneo são menores em relação aos demais regimes avaliados, já que a passagem de pequenas bolhas misturadas à fase líquida parece não interferir significativamente na variação do sinal. Para o caso do escoamento anular (Figura 4.31) a pequena variação do filme líquido é suficiente para que a flutuação do sinal aumente em comparação às variações do regime borbulhado. Variações intermediárias do sinal instantâneo encontradas no escoamento agitado (Figura 4.32) justificam-se pelo fato que neste caso as fases escoam de forma caótica em relação aos demais escoamentos.

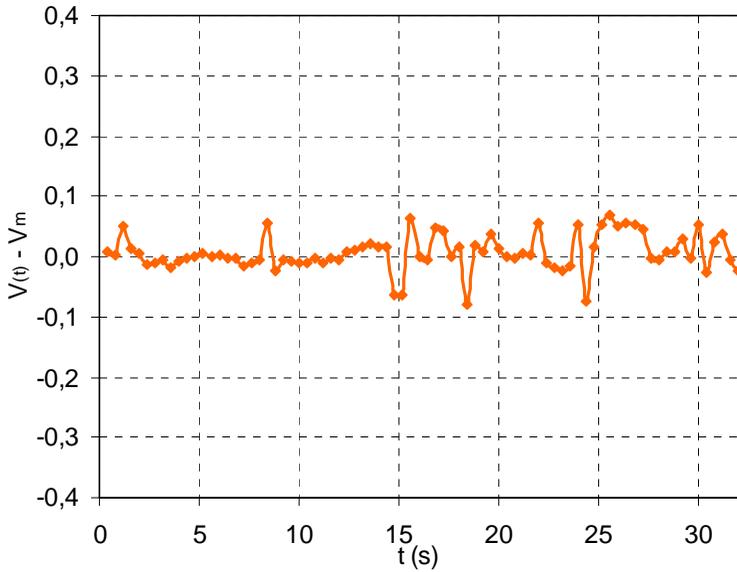


Figura 4.30 – Variações do sinal instantâneo para regime borbulhado:  
 $j_g = 0,02 \text{ m/s}$  e  $j_l = 1,24 \text{ m/s}$

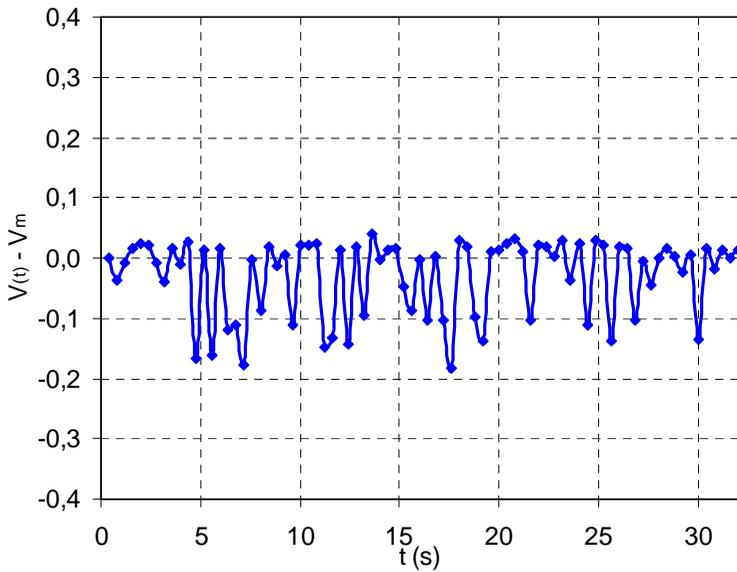


Figura 4.31 – Variações do sinal instantâneo para regime anular:  
 $j_g = 15 \text{ m/s}$  e  $j_l = 1,54 \text{ m/s}$

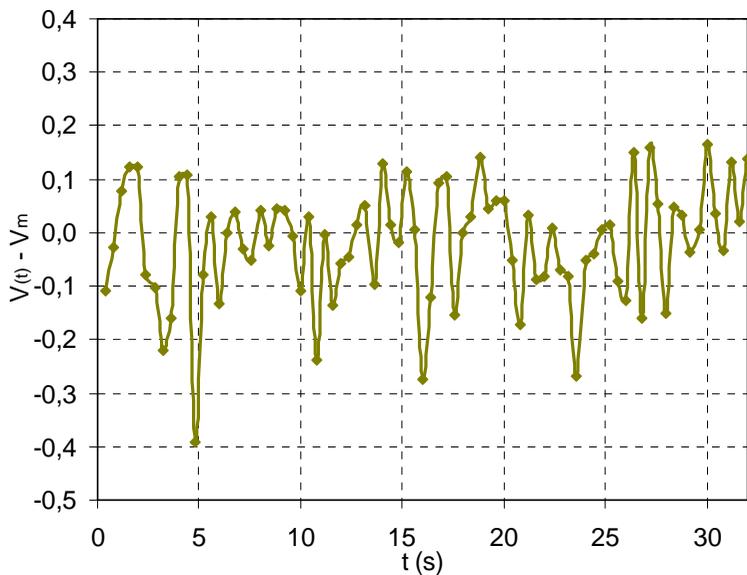


Figura 4.32 – Variações do sinal instantâneo para regime agitado:  
 $j_g = 0,80 \text{ m/s}$  e  $j_l = 0,36 \text{ m/s}$

Abaixo, é apresentada a variância,  $s^2$ , do sinal instantâneo para os regimes analisados acima.

Tabela 4.8 – Variância do sinal instantâneo para os regimes de escoamento analisados.

Regime de escoamento	$G_g \text{ (kg/m}^2\text{s)}$	$s^2$
Pistonado	0,1	0,094
Agitado	1	0,012
Anular	18	0,004
Borbulhado	0,03	0,001

#### 4.5. Resumo do capítulo

Foram comparados os resultados referentes às quedas de pressão para escoamentos bifásicos com os principais modelos existentes na literatura. Da mesma forma traçou-se o mapa de padrões de Mishima & Ishii (1983) e foram comparados visualmente os resultados obtidos com os padrões de escoamento pré-definidos.

Na seqüência, uma análise da fração de vazio foi realizada, confrontando-se as correlações de Lockhart-Martinelli e Baroczy com os resultados experimentais obtidos e plotados como fração de vazio através de uma correlação obtida em trabalhos anteriores, Pereira (2006) e Oliveira (2007).

Por fim, verificou-se visualmente determinados regimes de escoamento existentes durante os testes de fração de vazio com os fluxos mássicos de ar estabelecidos.

A partir das análises realizadas, pode-se inferir as seguintes conclusões:

- 1) Para baixos valores de título,  $x$ , envolvendo valores de  $x$ , de 0 a 0,16, correspondendo aos testes com fluxos mássicos de gás  $G_g = 0,1$  e  $1 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , o modelo de Chisholm surge como a melhor correlação seguida pelo modelo Homogêneo. Os menores valores do desvio médio de RMS nestas situações foram de 16,9 % para a correlação de Lockhart-Martinelli e 20,1 % para a correlação de Chisholm. A boa correspondência dos valores experimentais com o modelo Homogêneo era esperada pela ocorrência do regime borbuhlado para baixos valores do título de gás.
- 2) Para valores de título,  $x$  de 0,001 a 0,2, correspondendo aos testes com fluxos mássicos de gás  $G_g = 8$ ; 13 e  $18 \text{ kg/m}^2\text{s}$  o modelo de Friedel seguido da correlação de Lockhart-Martinelli apresentaram os melhores valores na predição da queda de pressão. Para a correlação de Lockhart-Martinelli o desvio de RMS encontrado foi de 33,7% para  $G_g = 8 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e no caso da correlação de Friedel o desvio de RMS foi de 19,1 % para  $G_g = 13 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e 21,1 % para  $G_g = 18 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . Além do desvio médio de RMS das correlações com respeito aos dados experimentais, são levadas em conta as frações dos dados com erros relativos como critério para avaliar as correlações de queda de pressão.
- 3) Quanto à análise visual dos regimes de escoamento e sua comparação com mapas de padrões, torna-se evidente a boa corres-

pondência entre os padrões apresentados e os regimes pré-determinados, com dificuldade para a avaliação de parâmetros transitórios de regimes de escoamento, como o caso do regime “agitado-anular”.

- 4) Seguindo a análise visual, as Figuras 4.21 e 4.22 apresentam uma comparação dos valores estimados a partir dos modelos de Friedel e Lockhart-Martinelli com os regimes de escoamento encontrados. Para a correlação de Friedel, verifica-se boa correspondência com os valores experimentais de queda de pressão quando da presença dos regimes borbulhado-agitado, pistonado e pistonado-anular. Já a correlação de Lockhart-Martinelli apresentou valores satisfatórios para a queda de pressão com relação aos dados experimentais à exceção do regime agitado-pistonado.
- 5) Quanto à análise da fração de vazio a partir dos sensores de impedância, o sinal resistivo médio obtido pelos eletrodos foi normalizado e plotado a partir dos diferentes valores de título de gás testados. Paralelamente à normalização dos sinais resistivos médios dos sensores, foram traçadas as correlações de Lockhart-Martinelli e Baroczy para evidenciar as variações do sinal normalizado frente às variações de fração de vazio
- 6) Uma última análise neste capítulo refere-se à Figura 4.28 onde cada imagem do micro-canal com uma configuração bifásica é retirada dos testes envolvendo fração de vazio e, apresentando valores correspondentes aos regimes de escoamento esperados. A seguir, a análise do sinal instantâneo dos sensores e sua variação, servem como mais um elemento de caracterização dos regimes de escoamento bifásico a partir da variação dos sinais do sensor de fração de vazio.

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS PARA O ESCOAMENTO SIMULTÂNEO EM SETE MICRO-CANAIS PARALELOS

Neste capítulo, é realizada a análise do escoamento bifásico simultâneo através de sete micro-canais verticais paralelos. O escoamento bifásico flui, na vertical, no sentido ascendente conforme as diferentes configurações testadas.

Assim como na análise de um único micro-canal, os sete micro-canais apresentam diâmetros hidráulicos iguais ( $D_h = 1,22 \text{ mm} \pm 4 \mu\text{m}$ ) e são fabricados em vidro.

Fluxos mássicos de 50, 100, 200 e 300  $\text{kg/m}^2\text{s}$  são operados com título de gás variando de 0 até 0,9 para  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 0 até 0,5 para  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , 0 até 0,25 para  $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e 0 até 0,16 para  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Na predição da fração de vazio do escoamento bifásico em sete micro-canais e na comparação da queda de pressão experimental é dada especial atenção ao modelo de mapas probabilísticos, utilizado por Niño (2002). Tal modelo baseia-se nas frações temporais dos regimes de escoamento, sendo estas obtidas através da análise fotográfica.

Para efeitos de comparação dos dados calculados sobre a fração de vazio, foram empregadas conjuntamente as correlações de Lockhart-Martinelli e Baroczy (eq. 2.57).

Na análise da queda de pressão, além do modelo de mapas probabilísticos, foram empregadas as correlações de Müller-Steinhagen e Chisholm. Foram avaliadas as quedas de pressão na entrada e saída dos distribuidores de vazão dos micro-canais e sua comparação com os modelos citados acima.

O presente capítulo contempla a análise gráfica para a queda de pressão e fração de vazio. Na sequência, é feita uma análise fotográfica dos micro-canais relacionando fluxos mássicos com os diferentes valores de título testados.

## 5.1. Frações temporais dos regimes de escoamento

Na utilização do modelo de mapas probabilísticos, segundo Niño (2002), é necessário obter os valores relativos às frações de tempo de ocorrência dos regimes de escoamento.

Os valores para as frações temporais dos regimes de escoamento nos sete micro-canais foram obtidos a partir da análise de 140 fotografias do conjunto de sete micro-canais, totalizando 980 imagens dos micro-canais. Um exemplo para a obtenção das frações temporais dos regimes de escoamento é apresentado no ANEXO V, referente ao fluxo mássico,  $G$ , de  $50 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e título,  $x = 0,03$ .

A seguir são apresentados os valores obtidos para as frações temporais dos regimes de escoamento considerando os fluxos mássicos de 50, 100, 200 e  $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e plotados nos mapas de padrões de escoamento apresentado por Niño (2002). A elaboração dos mapas de padrões é apresentada no ANEXO II.

Tabela 5.1 – Valores das frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

$x$ ( )	$F_{ann}$ (%)	$F_{int}$ (%)	$F_{liq}$ (%)	$F_{vap}$ (%)
0,03	25,7	11,4	62,8	-
0,15	66,7	34,3	-	-
0,3	31,4	68,6	-	-
0,5	25,7	74,3	-	-
0,6	31,4	68,6	-	-
0,8	28,6	60	-	11,4
0,9	28,6	11,4	-	60

Tabela 5.2 – Valores das frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

$x$ ( )	$F_{ann}$ (%)	$F_{int}$ (%)	$F_{liq}$ (%)	$F_{vap}$ (%)
0,02	22,8	14,3	62,8	-
0,08	80	20	-	-
0,16	85,7	14,3	-	-
0,24	82,8	17,1	-	-
0,3	74,3	25,7	-	-
0,4	71,4	28,6	-	-
0,5	68,6	31,4	-	-

Tabela 5.3 – Valores das frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

$x$ ( )	$F_{ann}$ (%)	$F_{int}$ (%)	$F_{liq}$ (%)	$F_{vap}$ (%)
0,01	20	5,7	74,3	-
0,04	60	34,3	5,7	-
0,08	74,3	25,7	-	-
0,12	80	20	-	-
0,16	80	20	-	-
0,20	91,4	8,6	-	-
0,25	88,6	11,4	-	-

Tabela 5.4 – Valores das frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$

$x$ ( )	$F_{ann}$ (%)	$F_{int}$ (%)	$F_{liq}$ (%)	$F_{vap}$ (%)
0,006	51,4	14,3	34,3	-
0,02	51,4	40	8,6	-
0,05	74,3	25,73	-	-
0,08	65,7	34,3	-	-
0,10	74,3	25,7	-	-
0,13	71,4	28,6	-	-
0,15	91,4	8,6	-	-

A observação dos resultados acima revela a ocorrência e preponderância dos regimes anular e intermitente em todas as configurações testadas. Já a fração de tempo em que o regime líquido aparece nos fluxos mássicos testados se resume a valores de título que variam de 0,01 e 0,05. A fração de tempo para ocorrência de regime com 100% de ar no canal foi a menos expressiva nos testes realizados e ocorre exclusivamente para  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$  com título,  $x$ , acima de 0,7.

As Figuras 5.1 a 5.4 representam os mapas probabilísticos referente às frações temporais de ocorrência dos regimes de escoamento. As linhas ininterruptas representam os valores teóricos obtidos por Niño (2002) e os pontos representam as frações temporais obtidas no presente trabalho.

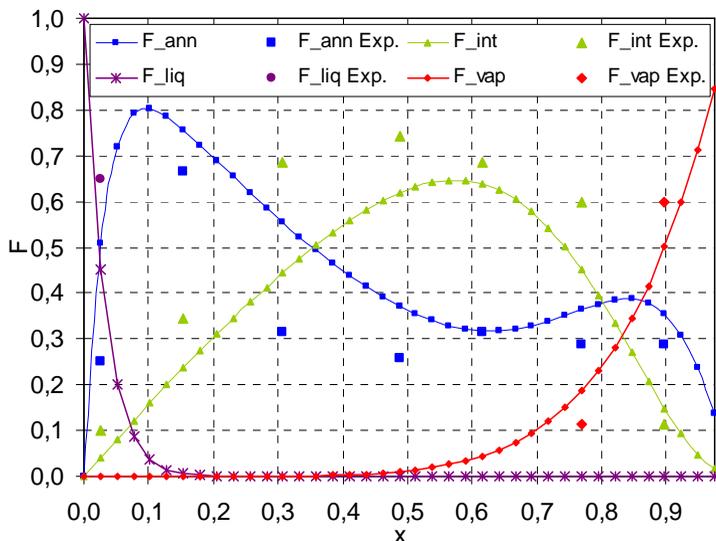


Figura 5.1 – Pontos experimentais do presente trabalho no mapa probabilístico das frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , Niño (2002)

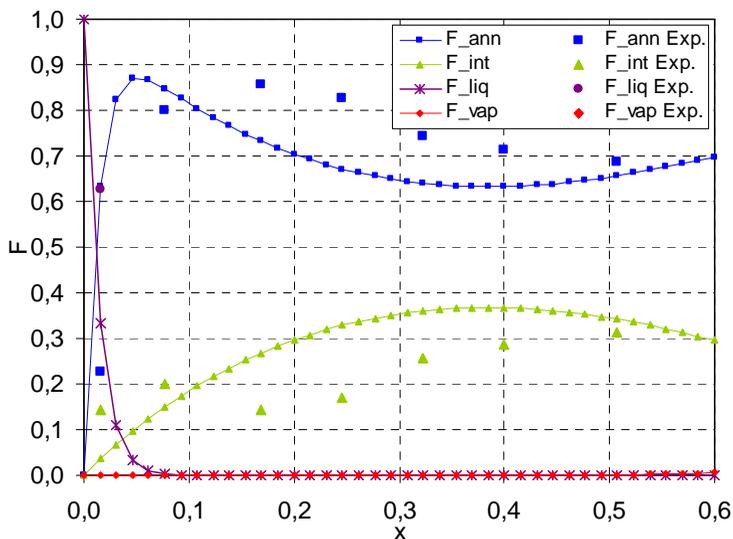


Figura 5.2 – Pontos experimentais do presente trabalho no mapa probabilístico das frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , Niño (2002)

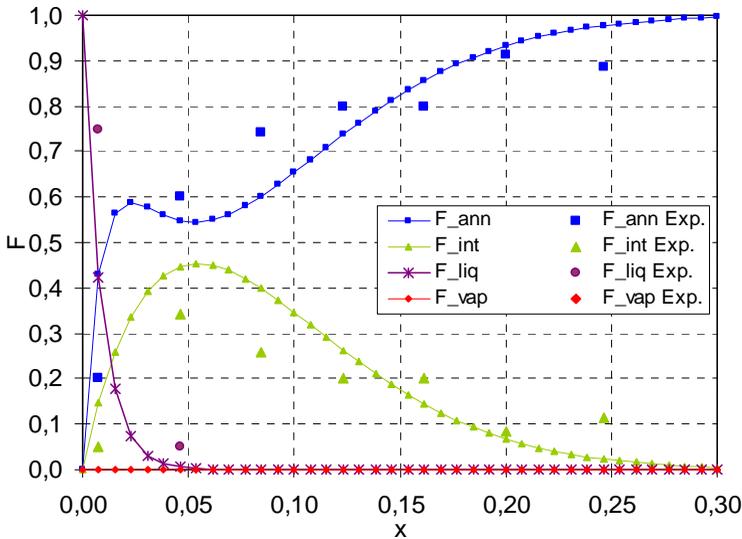


Figura 5.3 – Pontos experimentais do presente trabalho no mapa probabilístico das frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , Niño (2002)

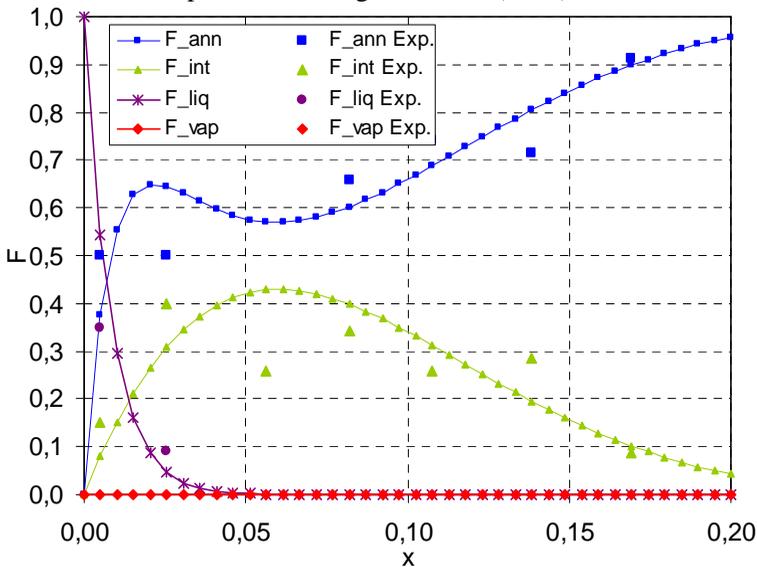


Figura 5.4 – Pontos experimentais do presente trabalho no mapa probabilístico das frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , Niño (2002)

## 5.2. Queda de pressão bifásica para o escoamento simultâneo em sete micro-canais paralelos

Aqui são apresentados os resultados da queda de pressão por atrito do escoamento bifásico ao longo dos sete micro-canais paralelos.

A queda de pressão é obtida experimentalmente a partir da pressão diferencial medida entre as linhas de centro dos distribuidores de vazão de entrada e saída do escoamento bifásico. Perdas de pressão por aceleração do escoamento são desprezadas e assume-se escoamento plenamente desenvolvido ao longo dos micro-canais.

Após a obtenção dos valores experimentais referentes à queda de pressão por atrito, é feita a comparação com os valores obtidos a partir de modelos existentes na literatura. No caso do modelo de mapas probabilísticos a comparação com os dados experimentais é feita a partir do modelo teórico obtido por Niño (2002) e calculado; este último a partir das frações temporais de regime de escoamento obtidas pela análise fotográfica do presente trabalho

As Figuras abaixo representam a queda de pressão por atrito nos micro-canais em paralelo a partir dos fluxos mássicos testados considerando o aumento do título de gás,  $x$ .

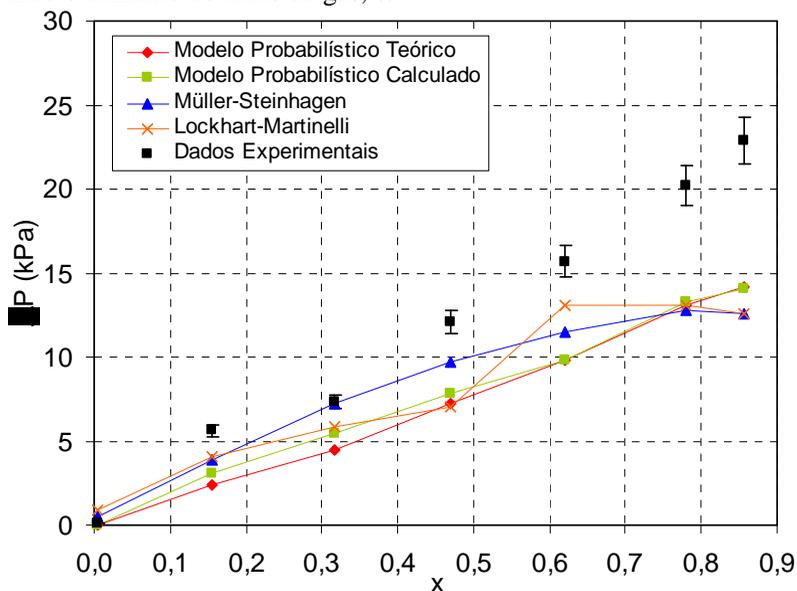


Figura 5.5 – Queda de pressão do escoamento bifásico através de sete micro-canais paralelos,  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

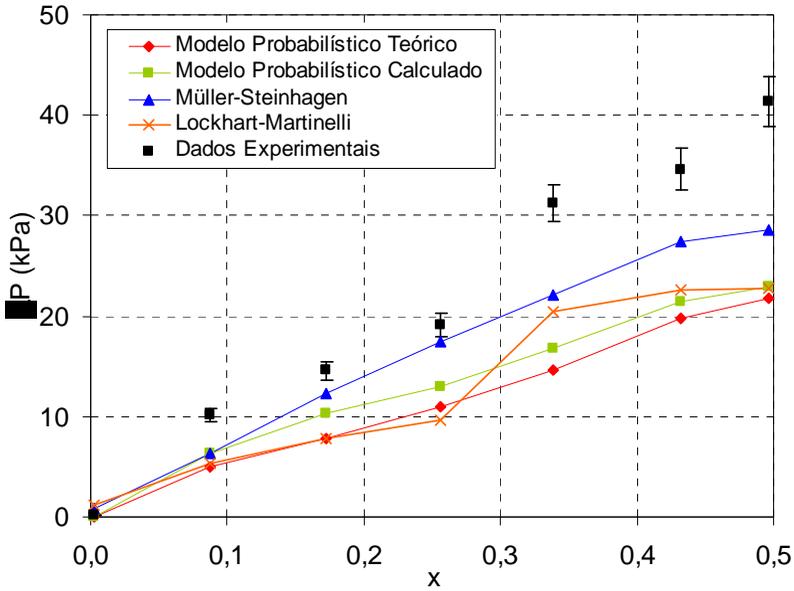


Figura 5.6 – Queda de pressão do escoamento bifásico através de sete micro-canais paralelos,  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

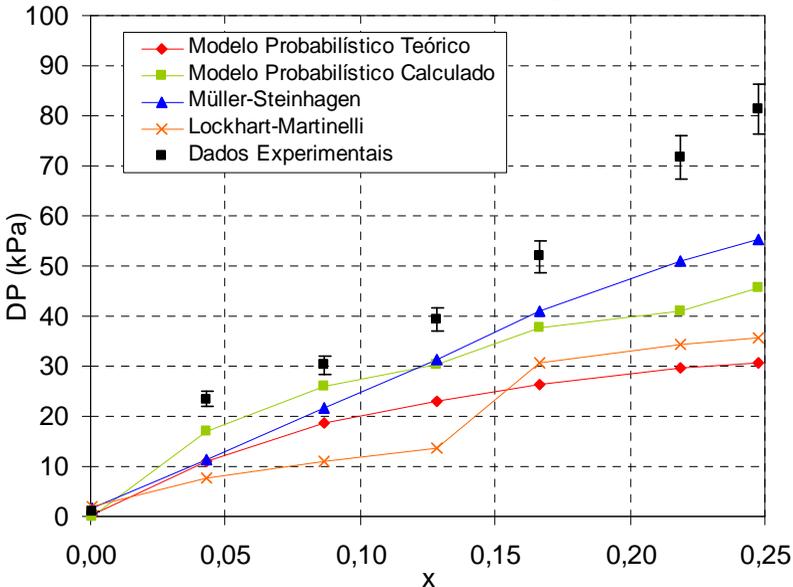


Figura 5.7 – Queda de pressão do escoamento bifásico através de sete micro-canais paralelos,  $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

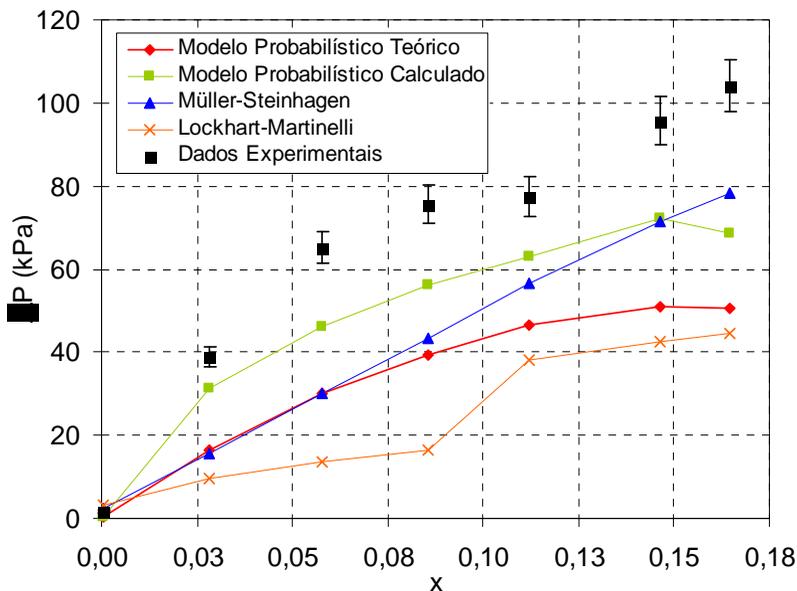


Figura 5.8 – Queda de pressão do escoamento bifásico através de sete micro-canais paralelos,  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

A seguir são apresentados os valores de RMS e o erro relativo dos valores experimentais com relação aos modelos testados.

Tabela 5.5 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 30\%$ (%)	Fração dos dados com erro relativo de $\pm 50\%$ (%)	RMS (%)
Probabilístico Teórico	-	71,4	49,5
Probabilístico Calculado	14,3	100	40,1
Müller – Steinhagen	57,1	85,7	36,4
Lockhart-Martinelli	42,9	100	34,7

Tabela 5.6 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo	Fração dos dados com erro relativo	RMS (%)
	de $\pm 30\%$ (%)	de $\pm 50\%$ (%)	
Probabilístico Teórico	-	57,1	53,4
Probabilístico Calculado	14,3	100	39,4
Müller – Steinhagen	57,1	85,7	32,6
Lockhart-Martinelli	-	85,7	47,3

Tabela 5.7 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo	Fração dos dados com erro relativo	RMS (%)
	de $\pm 30\%$ (%)	de $\pm 50\%$ (%)	
Probabilístico Teórico	-	42,9	55,3
Probabilístico Calculado	57,1	85,7	45,3
Müller – Steinhagen	57,1	85,7	34,7
Lockhart-Martinelli	14,3	28,6	54,2

Tabela 5.8 – Estatísticas das correlações usadas com relação aos dados experimentais para  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

Modelo	Fração dos dados com erro relativo	Fração dos dados com erro relativo	RMS (%)
	de $\pm 30\%$ (%)	de $\pm 50\%$ (%)	
Probabilístico Teórico	0	42,9	56,5
Probabilístico Calculado	71,4	85,7	37,0
Müller – Steinhagen	42,9	71,4	30,6
Lockhart-Martinelli	14,3	14,3	62,5

O menor valor de RMS medido foi de 30,6 % para  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  considerando o modelo de Müller-Steinhagen. As flutuações maiores apresentadas são do modelo de Lockhart-Martinelli onde o valor máximo de RMS foi 62,5 % para  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ . O modelo de Lockhart-Martinelli apresentou valores coerentes para os demais fluxos testados com valores de RMS que variaram entre 34,7 à 54,2% e o modelo de Müller-Steinhagen apresentou valores de RMS que variaram entre 32,6 a 34,7% para os demais fluxos. O modelo probabilístico teórico apresentou a menor quantidade de pontos, com relação aos outros modelos, abrangendo as faixas de erro relativo de  $\pm 30\%$  e  $\pm 50\%$ . Para este modelo os valores de RMS encontrados abrangeram a faixa de 49,5 a 56,5%.

O melhor modelo para as situações acima foi o modelo probabilístico calculado, que além de apresentar baixos valores de RMS também apresentou a maior quantidade de pontos dentro os outros modelos abrangendo as faixas de erro relativo de  $\pm 30\%$  e  $\pm 50\%$  agrupando quase 100 % de seus valores nestas faixas com exceção para os fluxos de 200 e 300  $kg/m^2s$  onde a porcentagem de pontos com erro relativo de  $\pm 30\%$  foram 57,1 e 71,4 %

### 5.3. Avaliação da fração de vazio para sete micro-canais

Para calcular a fração de vazio no interior dos sete micro-canais, optou-se pela utilização do modelo probabilístico, o qual, a partir da eq. (2.75), fornece os valores da fração de vazio baseados na análise fotográfica.

Uma vez calculada a fração de vazio a partir do modelo probabilístico comparou-se os valores calculados com os valores teóricos deste mesmo modelo e também com os valores das correlações de Lockhart-Martinelli e Baroczy (eq. 2.57).

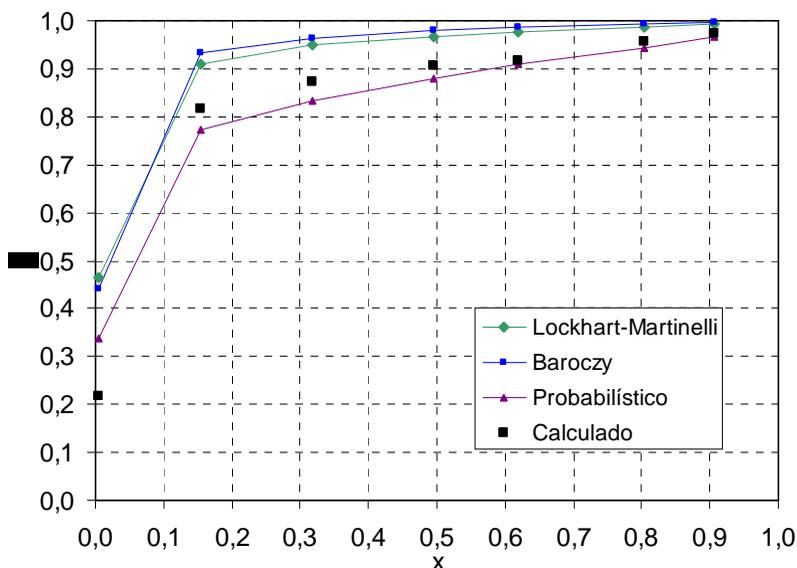


Figura 5.9 – Valores da fração de vazio para  $G = 50 kg/m^2s$ .

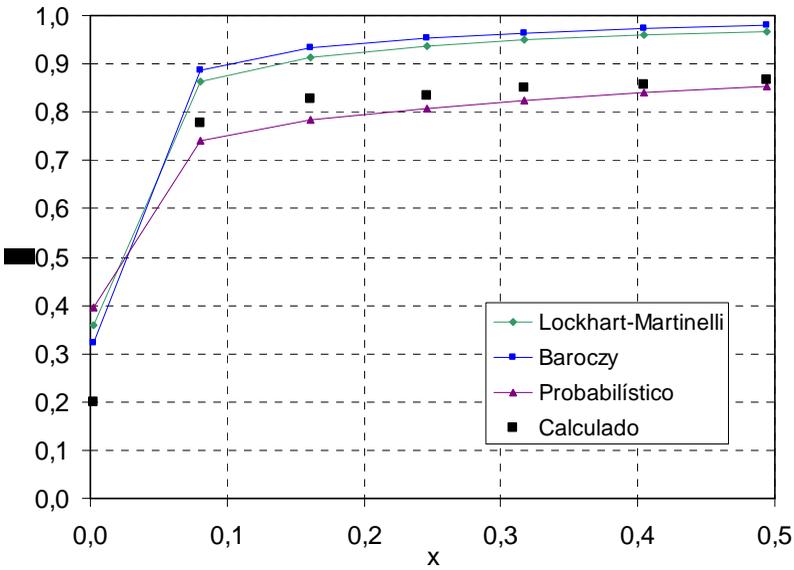


Figura 5.10 – Valores da fração de vazio para  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$

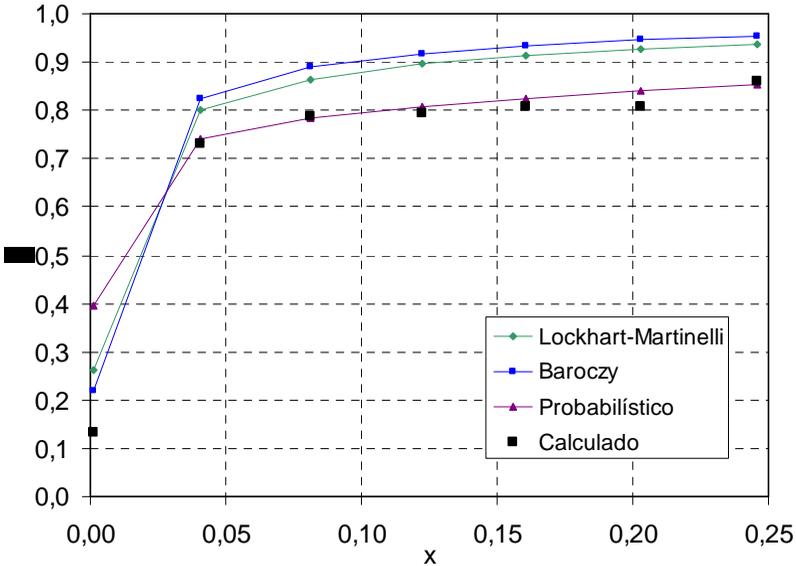


Figura 5.11 – Valores da fração de vazio para  $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$

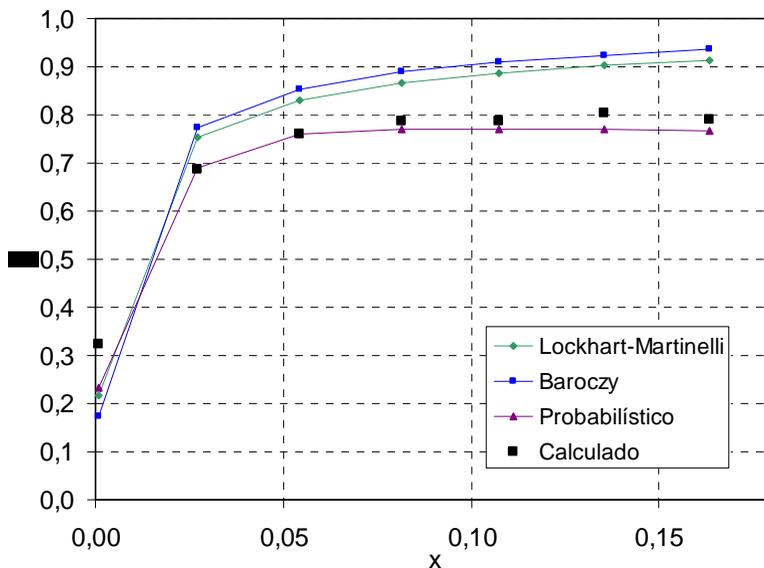


Figura 5.12 – Valores da fração de vazio para  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Tabela 5.9 – Valores de RMS para fração de vazio dos modelos utilizados com relação ao modelo probabilístico calculado,  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Modelo	RMS (%)
Probabilístico Teórico	21,2
Lockhart-Martinelli	43,3
Baroczy	39,7

Tabela 5.10 – Valores de RMS para fração de vazio dos modelos utilizados com relação ao modelo probabilístico calculado,  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Modelo	RMS (%)
Probabilístico Teórico	26,8
Lockhart-Martinelli	31,2
Baroczy	46,0

Tabela 5.11 – Valores de RMS para fração de vazão dos modelos utilizados com relação ao modelo probabilístico calculado,  $G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$

Modelo	RMS (%)
Probabilístico Teórico	22,6
Lockhart-Martinelli	38,1
Baroczy	28,1

Tabela 5.12 – Valores de RMS para fração de vazão dos modelos utilizados com relação ao modelo probabilístico calculado,  $G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$

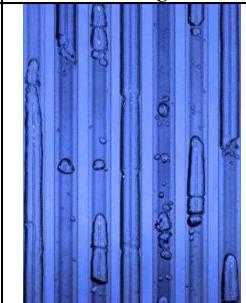
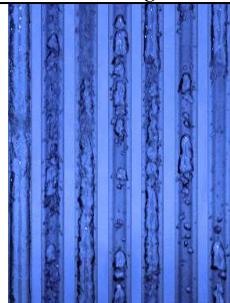
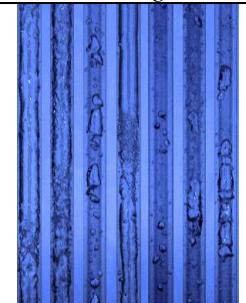
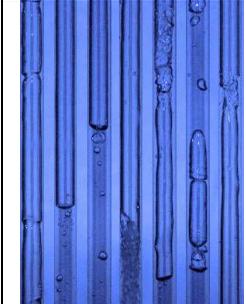
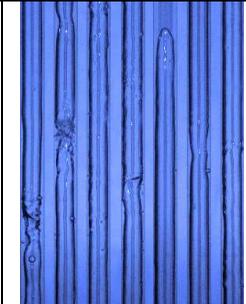
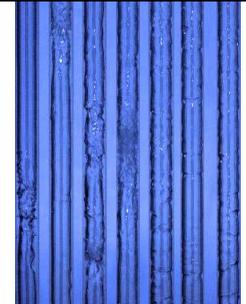
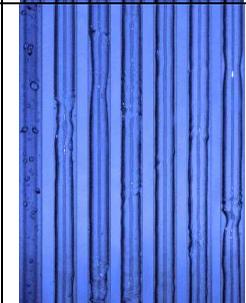
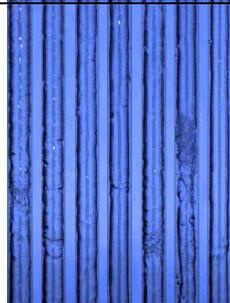
Modelo	RMS (%)
Probabilístico Teórico	10,7
Lockhart-Martinelli	15,7
Baroczy	22,3

Os menores valores de RMS para a fração de vazão dos resultados calculados foram apresentados pelo modelo probabilístico (ideal) com valores que variaram de 10,8 a 36,8 %. Já as flutuações com relação às correlações de Lockhart-Martinelli e Baroczy variaram de 15,7 a 43,3% e 22,3 a 39,7%

#### 5.4. Visualizações

Aqui é realizada a análise fotográfica do escoamento bifásico ao longo dos sete micro-canais testados. As fotografias a seguir correspondem a segmentos de 16 mm dos micro-canais, localizados no ponto médio da seção de testes. As imagens estão caracterizadas conforme o fluxo mássico e o título de gás em diferentes configurações de escoamento.

Verifica-se a presença de diferentes padrões de fluxo conforme as vazões de água e ar testadas em cada situação.

	$G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G = 200 \text{ kg/m}^2\text{s}$	$G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s}$
$x = 0,05$			
$x = 0,08$			
$x = 0,11$			
$x = 0,22$			

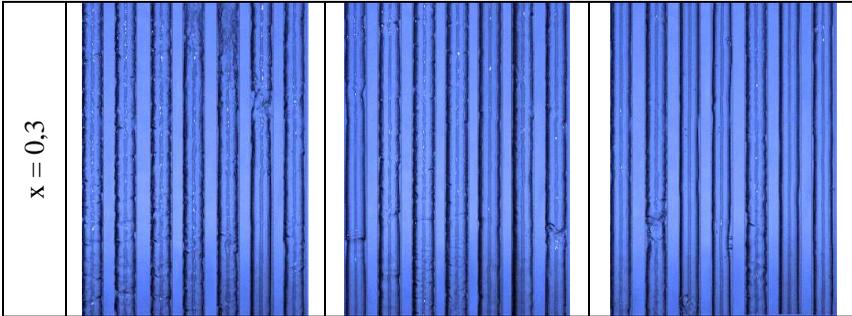


Figura 5.13 – Fotografias do escoamento bifásico água-ar em sete micro-canais paralelos.

É possível observar que para baixos valores de título o regime intermitente tende à ocorrência de regime pistonado e borbulhado para  $x = 0,05$  e  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e regimes agitado e borbulhado para  $x = 0,05$  com fluxos mássicos entre 200 a  $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ .

À medida que o título aumenta para valores entre 0,08 e 0,11, ocorre a coalescência das bolhas com a ocorrência de regimes pistonados e pistonado-anular para  $G = 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ , ao passo que para esses valores de título e fluxos mássicos entre 200 a  $300 \text{ kg/m}^2\text{s}$  ocorre a coalescência das bolhas originando regimes agitado e agitado anular.

Para todos os fluxos mássicos e título de gás igual ou superior a 0,22, ocorre a tendência de regimes anulares ainda apresentando situações de transição.

Cabe lembrar que estas fotografias representam situações instantâneas do escoamento bifásico e os diferentes canais da seção apresentaram diferentes regimes de escoamento para uma mesma configuração. Portanto outras fotografias com a mesma configuração bifásica podem apresentar diferenças, ainda que poucas, quanto aos regimes de escoamento estabelecidos.

## 5.5. Resumo do capítulo

Escoamento bifásico adiabático foi testado em uma sessão de testes contendo sete micro-canais em paralelo, com fluxo vertical ascendente.

Características de interesse como queda de pressão e fração de vazio foram testadas, para fluxos mássicos de 50, 100, 200 e 300  $kg/m^2s$  e valores de título mássico de gás variando de 0 a 0,9.

A análise fotográfica realizada durante os experimentos revela a ocorrência de mais de um padrão de fluxo em cada micro-canal do conjunto de sete micro-canais para todas as configurações testadas, fato este que dificulta ainda mais a obtenção de um modelo efetivo para o cálculo da queda de pressão e da fração de vazio para escoamento bifásico simultâneo através de micro-canais paralelos.

Em se tratando do modelo probabilístico onde são utilizados as frações temporais de ocorrência dos regimes de escoamento, a obtenção das frações ( $F_{liq}$ ,  $F_{int}$ ,  $F_{vap}$  e  $F_{ann}$ ) a partir das fotografias do escoamento apresentaram valores coerentes com aqueles obtidos por Niño (2002).

Conforme os resultados apresentados neste capítulo, o modelo probabilístico surge como um modelo coerente para o cálculo da queda de pressão apresentando valores de RMS de 30,6 a 62,5%. No que concerne ao cálculo da fração de vazio, sua eficácia torna-se duvidosa, já que sua avaliação depende exclusivamente da análise fotográfica.

Os modelos para queda de pressão de Müller-Steinhagen e o modelo probabilístico calculado apresentam os melhores resultados para as situações testadas, já o modelo probabilístico teórico apresenta a menor correspondência com os valores obtidos experimentalmente.

Quanto à visualização do escoamento, cada segmento tem 16 mm, distância suficiente para a visualização do padrão de fluxo em cada micro-canal. Os seguimentos das fotografias localizam-se no ponto médio dos micro canais.

## CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 6.1 Conclusões

Um estudo foi realizado sobre escoamento bifásico ar-água adiabático em um e sete micro-canais.

Dentre as características desejáveis, investigou-se a queda de pressão, a fração de vazio e a visualização dos escoamentos bifásicos tanto para um único micro-canal como para sete micro-canais.

Para um micro-canal, investigações sobre a queda de pressão sugeriram as correlações de Chisholm e Friedel como sendo as mais próximas dos valores experimentais, a primeira para valores de título de 0 a 0,16 e a segunda para valores de título de 0,001 a 0,2. Entretanto, um modelo para a queda de pressão bifásica ideal para todas as situações de escoamento parece ainda estar por ser desenvolvido.

Quanto à comparação dos padrões de fluxo com o mapa de padrão de Mishima e Ishii (1996), os resultados foram satisfatórios com exceção do escoamento agitado. Trabalhos futuros deverão contemplar uma quantidade maior de dados experimentais com condições suficientes para a elaboração de novos mapas de padrões.

Conforme verificado no capítulo 4, o sinal resistivo dos sensores de impedância foi normalizado e plotado conforme as variações de título de gás, paralelamente foram traçadas as correlações para fração de vazio de Lockhart-Martinelli e Baroczy (2.57). A falta de um método efetivo para calibração dos sensores de impedância e a determinação da fração de vazio a partir dos mesmos não foi realizada no presente trabalho. Sugere-se, portanto, a realização desta calibração em trabalhos futuros.

A análise do sinal instantâneo dos sensores ao longo do tempo, paralela à análise fotográfica dos escoamentos bifásicos testados, geraram resultados convincentes no que se refere à sensibilidade dos sensores para identificar os padrões de escoamento

Para o conjunto de sete micro-canais paralelos a investigação sobre a queda de pressão e fração de vazio obteve os melhores resultados com uso do modelo de mapas probabilísticos obtidos por Niño (2002).

O principal parâmetro dos mapas probabilísticos são as frações temporais de ocorrência dos regimes de escoamento, que se distinguem amplamente dos métodos convencionais usados na avaliação da queda

de pressão e fração de vazio pelo fato de incluírem neste modelo a análise fotográfica dos regimes de escoamento.

Para a queda de pressão, o uso do modelo de mapas probabilísticos apresentou os melhores resultados quando calculados a partir das frações temporais calculadas pela análise fotográfica. Os modelos convencionais para a queda de pressão de Müller-Steinhagen e Lockhart-Martinelli apresentaram valores satisfatórios com relação aos dados experimentais.

A avaliação da fração de vazio para os sete micro-canais é fator de dúvida já que os dados calculados dependem exclusivamente da análise fotográfica. É de interesse para estudos futuros o desenvolvimento de um sistema para avaliação da fração de vazio. Os sinais obtidos pelo sensor de impedância, operando no modo resistivo, não foram aqui apresentados já que, conforme discutido, mais de um padrão de escoamento surge em cada micro-canal do conjunto de sete micro-canais para cada configuração bifásica estabelecida, dificultando assim, qualquer relação do sinal instantâneo com o padrão de escoamento estabelecido. Uma solução futura seria a filmagem do escoamento em câmera rápida e então a comparação do sinal instantâneo resistivo ao longo do tempo em cada micro-canal.

Conclui-se por fim, que o estudo do escoamento bifásico em micro-canais compõe um amplo campo de pesquisa, onde há pouco consenso sobre as variáveis que regem o escoamento. É de suma importância a continuidade das investigações sobre escoamento bifásico e com isso o levantamento de um maior número de resultados, possibilitando uma maior certeza sobre o fenômeno dado à sua importância e utilização nos dias atuais.

## 6.2 Recomendações

Seguem, abaixo, sugestões para pesquisas futuras, de maneira a dar continuidade ao presente trabalho.

- Desenvolvimento de um novo sensor (ótico) para nova avaliação da fração de vazio do escoamento bifásico.
- Desenvolvimento de um sistema de calibração efetivo para o sensor de impedância elétrica usado neste trabalho.
- Utilização de outros fluidos na composição do escoamento bifásico visando à coleta de novos dados acerca da fração de vazio e queda de pressão bifásica.
- Elaboração de um novo mapa de padrões, com especial atenção às linhas de transição dos diferentes regimes de escoamento.
- Desenvolvimento de uma nova correlação para a queda de pressão para escoamento simultâneo em micro-canais.

## BIBLIOGRAFIA

- Barnea, D., Luninski, Y. & Taitel, Y. , (1983). Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes. *Can. J. Chem. Engng*, (61) 617-620.
- Baroczy, C. J., (1963). Correlation of liquid fraction in two-phase flow with application to liquid metals, *NAA-SR-8171. Butterworth, London, 1975.*
- Butterworth, D. (1975). A comparison of some void-fraction relationships for co-current gas-liquid flow. *International Journal of Multiphase Flow*, (1) 845-850.
- Caney, N., Marty, P., & Bigot, J. (2007). Friction losses and heat transfer of single-phase flow in a mini-channel. *Applied Thermal Engineering* , (27) 1715-1721.
- Celata, G., D'Annibale, F., Marco, P. D., Memoli, G., & Tomiyama, A. (2007). Measurements of rising velocity of a small bubble in a stagnant fluid in one- and two-component systems. *Experimental Thermal and Fluid Science* , (31) 609-623.
- Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. (2007). *Mecânica dos Fluidos*, Mc Graw Hill.
- Collier, J. G. & Thome, J. R. (1996). *Convective boiling and condensation, 4rd ed. Oxford, Clarendon.*
- Dukler, A. E., Wicks, M. & Cleveland, R. G. (1964). Frictional pressure drops in two-phase flow. *AICHe J*, (10) 44.
- Friedel, L. (1979). Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow. *European Two-Phase Flow Group Meeting*, paper E2. Ispra, Italy.
- Gonçalves, A. A. (2002). *Metrologia – Parte 1. Laboratório de Metrologia e Automação, UFSC.*

- Hetsroni, G., Mosyak, A., Segal, Z., & Pogrebnyak, E. (2003). Two-phase flow patterns in parallel micro-channels. *International Journal of Multiphase Flow* , (29) 341-360.
- Ide, H., Kariyasaki, A., & Fukano, T. (2007). Fundamental data on the gas-liquid two-phase flow in minichannels. *International Journal of Thermal Sciences* , (46) 519-530.
- Isbin, H. S., Moen, R. H., Wickey, R. O., Mosher, D. R. & Larson, H. C. (1958). Two-phase steam-water pressure drops. *Nucl. Sci. and Eng. Conf.*, Chigago.
- Jassim, E., & Newell, T. (2006). Prediction of two-phase pressure drop and void fraction in microchannels using probabilistic flow regime mapping. *International Journal of Heat and Mass Transfer* , (49) 2446-2457.
- Judy, J., Maynes, D., & Webb, B. (2002). Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer* , (45) 3477-3489.
- Kandlikar, S. (2002). Fundamental issues related to flow boiling in minichannels and microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science* , (26) 389-407.
- Kandlikar, S., Garimella, S., Li, D., Colin, S., & King, M. (2006). *Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels*. Chennai: Elsevier.
- Kariyasaki, A., Fukano, T., Ousaka, A. & Kagawa, M. (1992). Isothermal air-water two-phase up- and downward flows in a vertical capillary tube (1<sup>st</sup> report, Flow pattern and void fraction). *Trans. JSME (Ser. B)* (58) 2684-2690, in Japanese.
- Kew, P. & Cornwell, K. (1997). Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels. *Applied Thermal Engineering*, (17).

- Lockhart, R. W. & Martinelli, R. C. (1949). Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chemical Engineering Progress* (45) 39-48.
- Mishima, K., Hibiki, T. & Nishihara, H. (1993). Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts. *International Journal of Multiphase Flow*, (19) 115-124.
- Mishima, K., & Hibiki, T. (1996). Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 22, (4), 703-712.
- Mishima, K., & Ishii, M. (1984). Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27, (5), 723-737.
- Niño, V. (2002). Characterization of two-phase flow in microchannels. *Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL*.
- Obot, N. T. (2002). Toward a better understanding of friction and heat/mass transfer in microchannels - a literature review. *Microscale Thermophysical Engineering*, 6, 155-173.
- Oliveira, J. L. G. (2007). Medição de vazão de escoamentos bifásicos utilizando Tubo de Venturi ou placa de orifício associados a um sensor de fração de vazio com campo elétrico girante. Dissertação de mestrado – UFSC – Engenharia Mecânica.
- Ozawa, M., Akagawa, K., Sakaguchi, T., Tsukahara, T. & Fujii, T. (1979). Oscillatory flow instabilities in air-water two-phase flow systems. Report. Pressure drop oscillation. *Bull. JSME* (22) 1763-1770.
- Pehlivan, K., Hassan, I., & Vaillancourt, M. (2006). Experimental study on two-phase flow and pressure drop in millimeter-size channels. *Applied Thermal Engineering*, (26) 1506-1514.

- Pereira, M. (2006). Determinação das vazões em escoamentos bifásicos ar-água por meio de tubo venturi e medidor de fração de vazio. Dissertação de mestrado – UFSC – Engenharia Mecânica.
- Premoli, A., Francesco, D. & Prina, A. (1971). A dimensionless correlation for determining the density of two-phase mixtures. *Lo Termotecnica*, (25) 17-26.
- Revellin, Remi, Thome, John R. (2007). Adiabatic two-phase frictional pressure drops in microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (31) 673-685.
- Rocha, M. S. (2006). Circuito eletrônico de transdução dos sinais dos sensores de impedância de múltiplos eletrodos. SISEA – Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos. Dep. Eng. Mecânica - Escola Politécnica da USP. São Paulo - SP
- Saisorn, S., & Wongwises, S. (2008). A review of two-phase gas-liquid adiabatic flow characteristics in micro-channels. *Renewable & Sustainable Energy Reviews* , (12) 824-838.
- Serizawa, A., Feng, Z., & Kawara, S. (2002). Two-phase flow in microchannels. *Experimental Thermal and Fluid Science* , (26) 703-714.
- Suo, M. & Griffith, P. (1964). Two-phase flow in capillary tubes. *J Basic Eng*, (86) 576-82.
- Steinke, M., & S.G., K. (2006). Single-phase liquid friction factors in microchannels. *International Journal of Thermal Sciences* , (45) 1073-1083.
- Sugawara, S., Katsuta, K., Ishihara, I., & Muto, T. (1967). Consideration on the pressure loss of two-phase flow in small-diameter tubes. *In Proc. 4<sup>th</sup> National Heat Transfer Symp. of Japan*, 169-172, in Japanese.
- Sun, L., & Mishima, K. (2009). Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini-channels. *International Journal of Multiphase Flow* , (35) 47-54.

- Triplett, K., Ghiaasiaan, S., Abdel-Khalik, S., & Sadowski, D. (1999). Gas-liquid two-phase flow in microchannels. Part I: two-phase flow patterns. *International Journal of Multiphase Flow* , (25) 377-394
- Triplett, K. A., Ghiaasiaan, S. M., Abdel-Khalik, S. I., LeMouel, A., & McCord, B. N. (1999). Gas-liquid two phase flow in microchannels. Part II: void fraction and pressure drop. *International Journal of Multiphase Flow* , (25) 395-410.
- Ungar, E. K. & Cornwell, J. D (1992). Two-phase pressure drop of ammonia in small diameter horizontal tubes. *AIAA* 92-3891.
- Wallis, G. B. (1969). One dimensional two-phase flow. *McGraw-Hill, New York*.
- Whalley, P. B. (1987). *Boiling, condensation and gas-liquid flow*. Oxford: Oxford University Press.
- White, F. M. (1999). *Mecânica dos Fluidos*. 4<sup>a</sup> ed., LTC
- Zhang, W. (2006). Study on constitutive equations for flow boiling in mini-channels. *Ph. D. Thesis*, Kyoto University.

## ANEXO I - CRITÉRIO PARA TRANSIÇÃO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO PARA MINI- E MICRO-CANAIIS COM FLUXO ASCENDENTE

Nesta seção serão descritas as equações utilizadas por Mishima e Ishii (1983), na elaboração de um mapa que relaciona os padrões de fluxo com as velocidades superficiais do líquido e do gás.

Assim, podemos distinguir no mapa diferentes regiões, conforme a combinação das velocidades superficiais das fases, as quais representam os diferentes regimes de escoamento bifásico e suas transições.

### I. 1. Transição entre regime borbulhado e regime pistonado

A transição de escoamento borbulhado para escoamento pistonado ocorre principalmente devido às aglomerações de bolhas menores que por coalescência acabam formando bolhas maiores.

Esta transição ocorre normalmente para baixos valores de fração de vazio

$$\alpha \approx 0,3 \tag{I.1}$$

Com o objetivo de converter a equação (I.1) em uma forma convencional, baseada nas velocidades superficiais, é usada a relação à seguir entre  $j_g$  e  $j_l$ . Esta relação deriva-se da velocidade de arraste para regime borbulhado.

$$\frac{j_g}{\alpha} = C_0 j + \sqrt{2 \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_l^2} \right)^{1/4}} (1 - \alpha)^{1,75} \tag{I.2}$$

Onde  $C_0$  é dado por

$$C_0 = 1,2 - 0,2 \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)} \quad \text{para tubos circulares} \quad (\text{I.3})$$

$$j = j_g + j_l \quad (\text{I.4})$$

Portanto, a relação entre  $j_g$  e  $j_l$  nas transições vale,

$$j_l = \left(\frac{3,33}{C_0} - 1\right) j_g - \frac{0,76}{C_0} \left(\frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_l^2}\right)^{1/4} \quad (\text{I.5})$$

## I.2. Transição entre regime pistonado e regime agitado

Esta transição ocorre quando a fração de vazio média de toda a região exceder a da seção entre borbulhado-pistonado.

Antes desta transição ocorrer, as bolhas do regime pistonado estão alinhadas uma atrás da outra. Uma vez na fase transitória, a parte de trás da bolha começa a tocar o “nariz” da bolha anterior.

Sob estas condições as bolhas pistonadas tornam-se instáveis e a destruição e criação de novas bolhas começam a ocorrer.

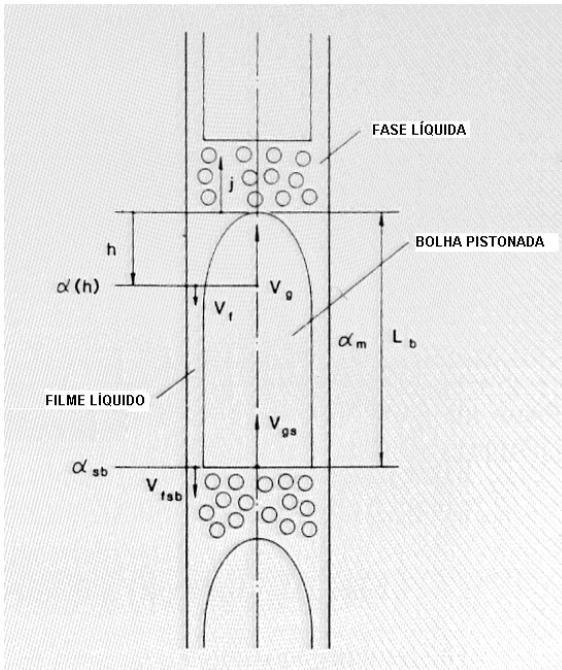


Figura I.1 – Modelo de escoamento pistonado, conforme Mishima e Ishii (1983)

Considerando a Fig. I.1, a aplicação da equação de Bernoulli permite obter a fração de vazão local entre o intervalo  $h$ , a partir do “nariz” da bolha

$$\alpha(h) = \frac{\sqrt{(2gh\Delta\rho/\rho_l)}}{\sqrt{(2gh\Delta\rho/\rho_l) + (C_0 - 1)j + 0,35\sqrt{(\Delta\rho gD/\rho_l)}}} \quad (I.6)$$

A equação a seguir, expressa a velocidade da bolha-pistonada

$$v_{gs} = C_0 + 0,35 \sqrt{\left( \frac{\Delta \rho g D}{\rho_l} \right)} \quad (\text{I.7})$$

A fração de vazio média é calculada por

$$\alpha_m = \frac{1}{L_b} \int_0^{L_b} \alpha(h) dh \quad (\text{I.8})$$

Onde  $L_b$  representa o comprimento médio da bolha-pistonada, integrando a equação (I.6) em combinação com a equação (I.8) fornece a seguinte expressão

$$\alpha_m = 1 - 2X + 2X^2 \ln \left( 1 + \frac{1}{X} \right) \quad (\text{I.9})$$

O parâmetro  $X$  pode ser expresso por

$$X \equiv \sqrt{\left( \frac{\rho_l}{2g\Delta\rho L_b} \right) \left[ (C_0 - 1)j + 0,35 \sqrt{\left( \frac{\Delta\rho g D}{\rho_l} \right)} \right]} \quad (\text{I.10})$$

Ainda podemos aproximar a equação (I.8) para valores de  $\alpha_m$  entre 0,6 e 0,9, através da expressão abaixo

$$\alpha_m = 1 - 0,813X^{0,75} \quad (\text{I.11})$$

O balanço de forças entre o filme líquido ao redor da bolha pistonada é dado por

$$\frac{f}{2} \rho_l v_{lsb}^2 \pi D = \frac{2}{3} \Delta \rho g A (1 - \alpha_{sb}) \quad (\text{I.12})$$

O fator de atrito  $f$  pode ser calculado como sendo

$$f = C_l \left[ \frac{(1 - \alpha_{sb}) v_{lsb} D}{v_l} \right]^{-m} \quad (\text{I.13})$$

Substituindo a equação (I.13) na equação (I.12) e resolvendo para  $v_{lsb}$ , obtêm-se

$$v_{lsb} = (1 - \alpha_{sb})^{(1+m)/(2-m)} \times \left[ 3C_l \left( \frac{D}{v_l} \right)^{-m} \frac{\rho_l}{\Delta \rho g D} \right]^{1/(m-2)} \quad (\text{I.14})$$

Ainda podemos representar a equação (I.14) na forma

$$v_{lsb} = \frac{\alpha_{sb} v_{gs} - j}{1 - \alpha_{sb}} \quad (\text{I.15})$$

A equação resultante vale

$$\alpha_{sb} = \frac{j + (1 - \alpha_{sb})^{3/(2-m)} \left[ 3C_f (D/v_l)^{-m} (\rho_l / \Delta \rho g D) \right]^{1/(m-2)}}{C_0 j + 0,35 \sqrt{(\Delta \rho g D / \rho_l)}} \quad (\text{I.16})$$

Para a maioria dos casos, a espessura do filme líquido aproxima-se daquela do modelo turbulento, assim assume-se valores para  $m = 0,2$  e  $C_f = 0,046$ . A equação (I.16) torna-se

$$\alpha_{sb} = \frac{j + 3ab(1 - \alpha_{sb})^{1,67}}{C_0 j + 0,35b} \quad (\text{I.17})$$

Onde

$$a \equiv \left( \frac{\Delta \rho g D^3}{\rho_l v_l^2} \right)^{1/18} \quad (\text{I.18})$$

$$b \equiv \sqrt{\left( \frac{\Delta \rho g D}{\rho_l} \right)} \quad (\text{I.19})$$

Equação (I.17) pode ser resolvida pela aproximação abaixo

$$(1 - \alpha_{sb})^{1,67} \approx 0,25(1 - \alpha_{sb}) \quad (\text{I.20})$$

Assim, obtêm-se

$$\alpha_{sb} = \frac{j + 0,75ab}{C_0 j + 0,35b + 0,7ab} \quad (\text{I.21})$$

Por outro lado a equação (I.6), fornece

$$\alpha(L_b) = \frac{y}{y + (C_0 - 1)j + 0,35b} \quad (\text{I.22})$$

Onde

$$y \equiv \sqrt{\left(\frac{2\Delta\rho g L_b}{\rho_l}\right)} \quad (I.23)$$

Baseado na condição  $\alpha(L_b) = \alpha_{sb}$ , obtêm-se

$$y = j + 0,75ab \quad (I.24)$$

Assim, a solução para o comprimento da bolha-pistonada é dada por

$$\sqrt{\left(\frac{2\Delta\rho g L_b}{\rho_l}\right)} = j + 0,75 \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho g D}{\rho_l}\right) \left(\frac{\Delta\rho g D^3}{\rho_l v_l^2}\right)^{1/8}} \quad (I.25)$$

Assumindo que o critério de transição de pistonado para agitado ocorre quando a fração de vazio média de toda a região atinge a fração de vazio média da bolha pistonada, o critério de transição torna-se

$$\alpha \geq 1 - 0,813 \times \left\{ \frac{(C_0 - 1)j + 0,35\sqrt{(\Delta\rho g D / \rho_l)}}{j + 0,75\sqrt{(\Delta\rho g D / \rho_l)(\Delta\rho g D^3 / \rho_l v_l^2)^{1/8}}} \right\}^{0,75} \quad (I.26)$$

Para fluidos de baixa viscosidade como o caso da água podemos substituir a constante  $(\Delta\rho g D^3 / \rho_l v_l^2)^{1/8} \approx 3$ .

O modelo abaixo é usado em termos das velocidades superficiais do líquido e do gás, respectivamente

$$\alpha = \frac{j_g}{C_0 + 0,35(\Delta\rho g D / \rho_l)} \quad (I.27)$$

### I.3. Transição entre regime agitado e regime anular

O critério para esta transição tem sido desenvolvido, considerando dois diferentes mecanismos.

(a) fluxo reverso na seção do filme líquido através de bolhas grandes

(b) destruição das bolhas pistonadas devido às deformações

O primeiro mecanismo assume que na seção do filme líquido por onde passam as bolhas, a velocidade de arraste anular pode ser calculada por

$$\frac{j_g}{\alpha} - j = \frac{1 - \alpha}{\alpha + \left\{ (1 + 75(1 - \alpha)) / \sqrt{\alpha} (\rho_g / \rho_l) \right\}^{1/2}} \times \left\{ j + \sqrt{\left[ \frac{\Delta \rho g D (1 - \alpha)}{0,015 \rho_l} \right]} \right\} \quad (\text{I.28})$$

Ajustando para a condição de fluxo reverso com  $j_l = 0$

$$j_g = \sqrt{\left( \frac{\Delta \rho g D}{\rho_g} \right)} \alpha^{1,25} \left\{ \frac{1 - \alpha}{0,015 [1 + 75(1 - \alpha)]} \right\}^{1/2} \quad (\text{I.29})$$

Entretanto, para o intervalo de  $\alpha$  relevante para o presente caso, a equação (I.29) pode ser aproximada como sendo

$$j_g = \sqrt{\left( \frac{\Delta \rho g D}{\rho_g} \right)} (\alpha - 0,11) \quad (\text{I.30})$$

Onde  $\alpha$  deve satisfazer a condição dada pela equação (I.26).

Por outro lado, o segundo critério pode ser obtido no começo do arraste da gota que envolve um balanço entre a força de cisalhamento do vapor e a força de retenção da tensão superficial.

$$\frac{\mu_l j_g}{\sigma} \sqrt{\left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)} = N_{\mu}^{0,8} \quad (\text{I.31})$$

Onde

$$N_{\mu} \equiv \mu_l / \left[ \rho_l \sigma \sqrt{\left(\frac{\sigma}{g \Delta \rho}\right)} \right]^{1/2} \quad (\text{I.32})$$

A transição do escoamento agitado para anular tem por exigência do arraste a seguinte expressão

$$j_g \geq \left( \frac{\sigma g \Delta \rho}{\rho_g^2} \right)^{1/4} N_{\mu}^{-0,2} \quad (\text{I.33})$$

O segundo critério é aplicável para diâmetros de canais maiores que a equação abaixo

$$D > \frac{\sqrt{(\sigma / \Delta \rho g)} N_{\mu}^{-0,4}}{[(1 - 0,11 C_o) / C_o]^2} \quad (\text{I.34})$$

Assim, o segundo critério é usado para prever a ocorrência de escoamento anular ou agitado-anular.

$$\alpha = \frac{j_g}{C_o + \sqrt{2(\sigma g \Delta \rho / \rho_l^2)^{1/4}}} \quad (\text{I.35})$$

As equações descritas nos permitem a elaboração de um mapa com regimes de escoamento e suas linhas de transição.

## ANEXO II - MÉTODO PARA ELABORAÇÃO DAS CURVAS DE AJUSTE PARA FRAÇÕES DE TEMPO DOS REGIMES DE ESCOAMENTO

Nesta seção é apresentado um método para elaboração das curvas de ajuste dos regimes de escoamento relacionado às frações de tempo respectivas à ocorrência de cada um dos regimes.

As curvas de ajuste foram elaboradas a partir dos dados obtidos por Niño (2002).

A incerteza dos dados encontrados para a fração de tempo foi menor que 17% enquanto que o erro das medidas para o título de gás pode ser avaliado como  $\pm 0,003x^{-1,193}$ . As medições para o fluxo mássico apresentaram erro menor que  $\pm 0,5\%$ .

A curva de ajuste para a fração de tempo do líquido pode ser expressas por

$$F_{liq} = (1 - x)^a \quad (\text{II.1})$$

Esta curva de ajuste contém os limites físicos da fração de tempo do líquido com uma fração de tempo equivalente a 1 quando o título de gás vale 0 e uma fração de tempo igual a 0 quando o título de gás vale 1.

A curva de ajuste para a fração de tempo de regime intermitente (pistonado e agitado) é expressa abaixo

$$F_{int} = (1 - x)^{bx^c} - (1 - x)^d \quad (\text{II.2})$$

A equação (II.2) contém os limites físicos para a fração de tempo de regime intermitente com uma fração de tempo equivalente a 0 para títulos de gás equivalentes a 0 e 1.

A curva de ajuste para a fração de tempo onde o regime de escoamento apresenta altos títulos de vapor é dada na equação (II.3).

$$F_{vap} = x^g \quad (\text{II.3})$$

A equação (II.3) contém os limites físicos da fração de tempo para o vapor com uma fração de tempo igual a 0 para o título de gás

equivalente a 0 e uma fração de tempo igual a 1 para o título de gás equivalente a 1.

A curva de ajuste proposta para o regime anular é simplesmente 1 menos o somatório das frações de tempo de todos os outros regimes, conforme pode ser expresso na equação (II.4).

$$F_{ann} = 1 - (F_{liq} + F_{int} + F_{vap}) \quad (II.4)$$

As curvas de ajuste acima foram obtidas para água-ar a 20°C, diâmetro hidráulico,  $D_h = 1,54 \text{ mm}$ , 6 micro-canais em paralelo e fluxos mássicos de 50, 100, 200 e 300  $\text{kg/m}^2 \text{ s}$ .

O erro absoluto das curvas de ajuste dos regimes líquido, intermitente, anular e vapor são 0,001; 0,0027; 0,007 e 0,031.

As constantes para as curvas de ajuste são descritas na Tabela II.1

Tabela II.1 – constantes das curvas de ajuste dos regimes de escoamento para água-ar a 20°C.

	$G=50 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$G=100 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$G=200 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$	$G=300 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$
a	30,60	71,09	111,02	118,28
b	1,20	1,21	29,17	54,34
c	4,04	0,19	0,57	0,93
d	1,62	2,90	22,81	16,86
g	6,40	9,91	21,67	37,94

### ANEXO III - ANÁLISE DE INCERTEZAS

Aqui são apresentados os métodos utilizados para a determinação das incertezas referente aos resultados experimentais do presente trabalho. As equações aqui apresentadas foram retiradas do texto de Gonçalves (2002).

A seguir são apresentados alguns termos utilizados na metrologia e que são importantes para a análise de incertezas.

#### - *Medição*

Conjunto de operações que tem por objetivo monitorar, controlar ou investigar um processo ou fenômeno físico.

#### - *Mensurando*

É o valor momentâneo de uma grandeza física que é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão, e reconhecida internacionalmente. O mensurando pode ser classificado como sendo variável ou invariável.

Na análise realizada neste trabalho, onde as variações de pressão e velocidade são constantes devido às instabilidades provocadas pela interface líquida-gasosa, podemos classificar as grandezas físicas como mensurandos variáveis.

#### III.1. Mensurando variável

É o caso em que o valor do mensurando varia ao longo do tempo ou de sua posição. Dessa forma, é importante realizar inúmeras medições. Pode-se considerar um mensurando como variável quando suas variações são maiores que a resolução do sistema de medição.

Assim, o resultado de uma medição,  $RM$ , é expresso pela equação abaixo

$$RM = MI \pm E_{\max} \quad (\text{III.1})$$

Sendo

$MI$  média das indicações (medições) obtidas.

$E_{\max}$  erro máximo de medição nas condições em que esta foi efetuada.

O erro máximo de medição,  $E_{\max}$ , depende do resultado da incerteza de medição,  $I_{SM}$ , e do resultado apresentado sobre a incerteza de uma série de observações,  $I_O$

Assim, a eq. (III.1) pode ser rescrita como

$$RM = MI \pm \sqrt{I_{SM}^2 + I_O^2} \quad (III.2)$$

### III.2. Incerteza padrão

A incerteza padrão ( $u$ ) de uma fonte de incertezas é definida como a faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a um desvio padrão. Portanto, corresponde ao desvio padrão do erro aleatório associado à fonte de incertezas.

A estimativa da incerteza padrão associada a uma fonte de incertezas pode ser efetuada através de procedimentos estatísticos ou por outros meios.

- *Estimativa da incerteza padrão por meios estatísticos (avaliação “tipo A”)*

Nesse caso, o desvio padrão experimental associado à uma fonte de incertezas é estimado a partir de “ $n$ ” valores do mensurando. Assim a incerteza padrão coincide com o valor estimado do desvio padrão.

Considere  $q$  uma variável aleatória representando uma fonte de incertezas sobre o resultado de uma medição. A média de  $q$  pode ser estimada por

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (\text{III.3})$$

O desvio padrão experimental de  $q$ , representado por “ $s$ ”, vale

$$s(q) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}} \quad (\text{III.4})$$

Assim a incerteza padrão associada à fonte de incertezas quando realizada somente uma medição é dada por

$$u(q) = s(q) \quad (\text{III.5})$$

Entretanto, quando “ $m$ ” medições são realizadas, seu valor passa a ser

$$u(q) = \frac{s(q)}{\sqrt{m}} \quad (\text{III.6})$$

- *Estimativa da incerteza padrão por meios não estatísticos (avaliação “tipo B”)*

É o caso em que são consideradas informações como medições anteriores, certificados de calibração e outras informações técnicas do instrumento para estimar o desvio padrão associado à fonte de incertezas.

Comumente são associados os limites superior ( $LS$ ) e inferior ( $LI$ ) dentro dos quais situam-se os efeitos da fonte de incertezas. Nesse caso, a variável  $q$  assume seu valor médio a partir da expressão abaixo

$$\bar{q} = \frac{LI + LS}{2} \quad (\text{III.7})$$

e

$$u(q) = \frac{LS - LI}{2\sqrt{3}} \quad (\text{III.8})$$

### - Incerteza combinada

Freqüentemente na medição direta, os efeitos associados às várias fontes de incertezas se refletem sobre a indicação do sistema de medição como parcelas aditivas, isto é, cada fonte de incertezas soma (ou subtrai) sua contribuição sobre a indicação. É como se houvesse uma soma dos efeitos de várias variáveis aleatórias.

Assim, a incerteza padrão combinada ( $u_c$ ) das várias fontes de incertezas pode ser estimada a partir das incertezas padrão de cada fonte de incertezas por

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_p^2} \quad (\text{III.9})$$

sendo  $u_1, u_2, \dots, u_p$  as incertezas padrão de cada uma das “ $p$ ” fontes de incertezas.

Na forma geral, a incerteza padrão de  $y$ , onde  $y$  é a estimativa de um mensurando  $Y$ , é obtida pela combinação apropriada das incertezas padrão das estimativas de entrada  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Sendo todas as grandezas de entrada independentes, a incerteza combinada,  $u_c(y)$  é dada por

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2} u^2(x_i) \quad (\text{III.10})$$

onde  $f$  é a função que representa o mensurando  $Y$ , dependente das grandezas  $x_1, x_2, \dots, x_n$

Cada  $u(x)$  é uma incerteza padrão (*Tipo A* ou *Tipo B*).

### III.3. Aplicações

- *Cálculo da incerteza de medições diretas*

Abaixo são apresentadas as grandezas medidas de forma direta:

- $A$  : área da seção transversal dos tubos;
- $Q_l$  e  $Q_g$  : vazões volumétricas de água e ar medidas pelo rotâmetro e medidor de vazão de ar.
- $\Delta p$  : queda de pressão medida através do transdutor de pressão diferencial.

Para obtermos o valor da incerteza da área da seção transversal dos tubos,  $A$ , partiremos da expressão abaixo:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{III.11})$$

onde o parâmetro de interesse é o diâmetro,  $D$ , dos micro-canais. A incerteza da área da seção transversal dos tubos é dada por

$$u_A(D) = \sqrt{\left( \frac{\partial A}{\partial D} \right)^2} u_D^2 \quad (\text{III.12})$$

$$u_A(D) = \frac{\pi D}{2} u_D \quad (\text{III.13})$$

A seguir, segue o cálculo da incerteza do título de gás,  $x$ , em função das incertezas das massas de água e gás,  $m_l$  e  $m_g$ , respectivamente.

$$u_x(m_l, m_g) = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial m_l}\right)^2 u_{m_l}^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial m_g}\right)^2 u_{m_g}^2} \quad (\text{III.14})$$

a partir da eq. (III.14), chega-se à seguinte expressão para o cálculo da incerteza do título de gás

$$u_x(m_l, m_g) = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{m} - \frac{m_g}{m^2}\right) u_{m_g}\right)^2 + \left(-\frac{m_g}{m^2} u_{m_l}\right)^2} \quad (\text{III.15})$$

O cálculo da incerteza do transdutor de pressão diferencial, segundo dados do fabricante, é dado a partir da expressão abaixo

$$U_{\Delta P}(V_{AP}) = (2346) + 0,005 * V_{\Delta P} * 69000 \quad (\text{III.16})$$

onde  $U_{\Delta P}$  é dado em [ Pa ] e  $V_{\Delta P}$  é dado em [ mV ].

### III.4. RMS dos desvios dos pontos calculados em relação aos medidos

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{x_{i \text{ calculado}} - x_{i \text{ medido}}}{x_{i \text{ medido}}} \right]^2} \cdot 100 \quad (\text{III.17})$$

### III.5. Certificado de medição do micro-canal

A Figura III.1 trata-se de um laudo de medição, obtido no Laboratório de Metrologia Dimensional da Fundação CERTI – Florianópolis, mostrando o resultado das dimensões referentes ao diâmetro interno dos micro-canais usados neste trabalho.



Laboratório de  
**METROLOGIA DIMENSIONAL**  
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



## Relatório de Medição

Data da Medição: 30/09/10

n. 5573/10

Data da Emissão: 30/09/10

6. RESULTADOS:

Página: 2 de 2

Item	DENOMINAÇÃO	MEDIDO	U	k	Veff
		[ mm ]	[ mm ]		
1	Diâmetro Interno	1,220	0,004	2,00	Infinito

*O erro de forma do diâmetro é de aproximadamente 0,037 mm*

Clodoaldo de Campos Marques  
Gerente Técnico

Clodoaldo de Campos Marques  
Técnico Metrologista

Figura III.1: Laudo de medição do micro-canal com  $D_h = 1,22 \text{ mm}$ .

## ANEXO IV - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FRAÇÃO DE VAZIO – CIRCUITO ELETRÔNICO

É apresentado um esquema do circuito eletrônico de transdução eletrônica dos sinais, conforme Rocha (2006).

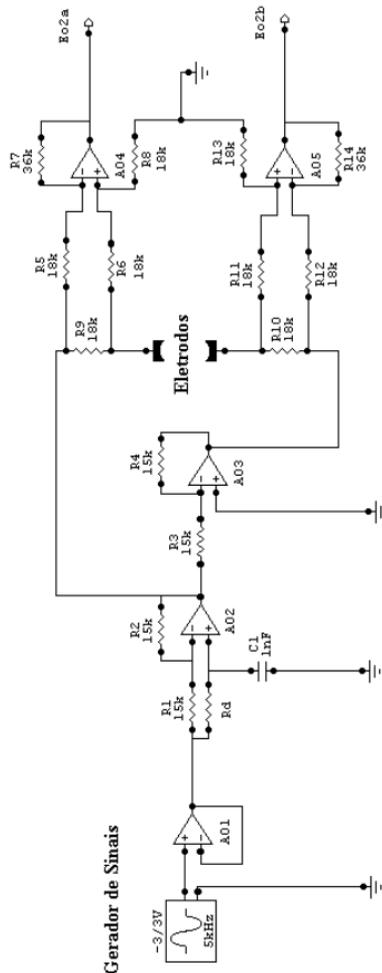


Figura IV.1: Circuito de transdução eletrônica dos sinais, incluídos a geração e pós-tratamento dos dados – Parte A.

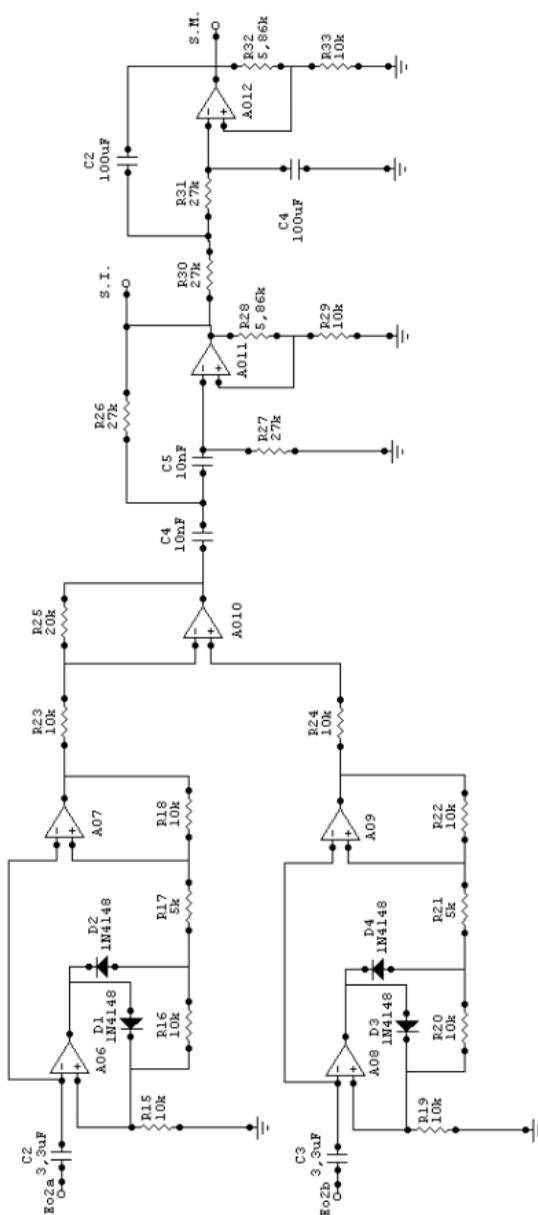
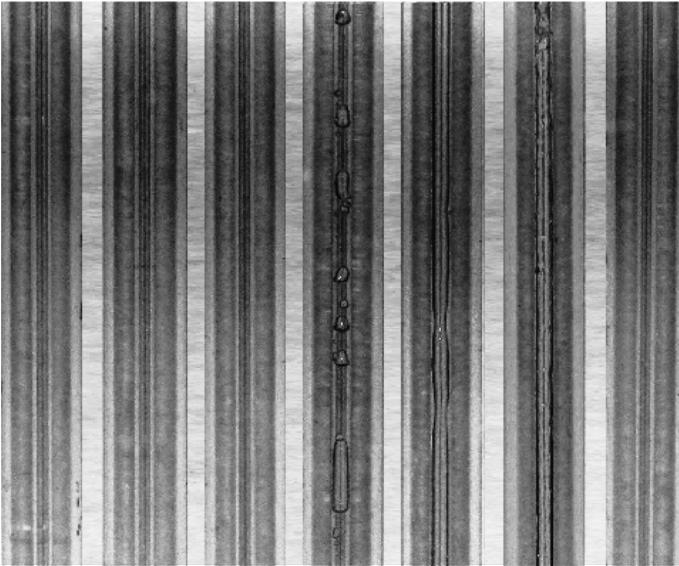


Figura IV.2: Circuito de transdução eletrônica dos sinais, incluídos a geração e pós-tratamento dos dados – Parte B.

## ANEXO V – ANÁLISE VISUAL DAS FRAÇÕES TEMPORAIS DOS REGIMES DE ESCOAMENTO

Nesta seção é apresentado o método de obtenção das frações temporais dos regimes de escoamento a partir da análise fotográfica do escoamento bifásico em sete micro-canais paralelos.

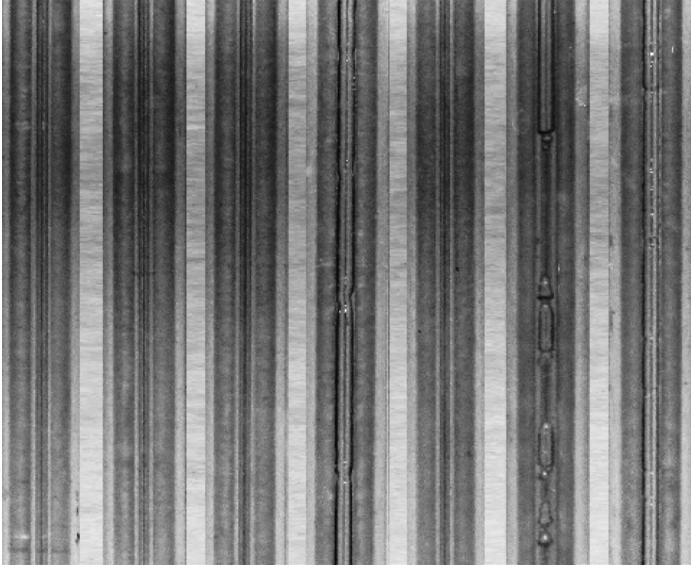
A análise fotográfica abaixo, se refere ao escoamento bifásico com fluxo mássico,  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e título de gás,  $x = 0,03$ .



---

*líquido, líquido, líquido, intermit., anular, anular, líquido*

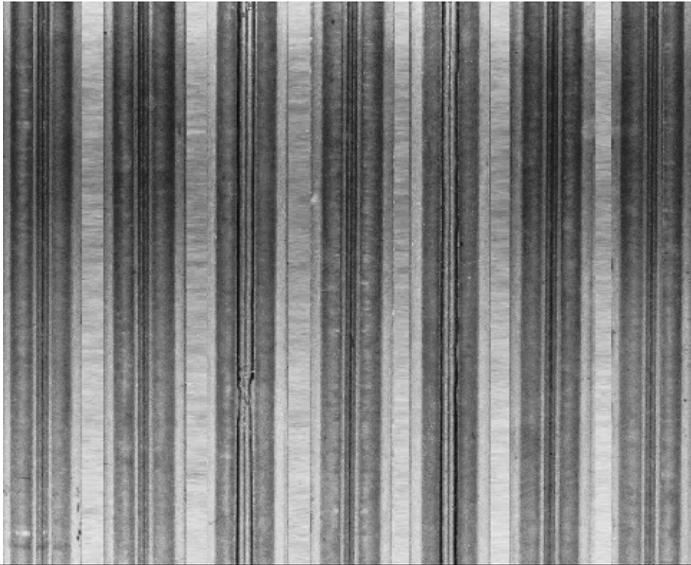
---




---

*líquido, líquido, líquido, anular, líquido, intermit., anular*

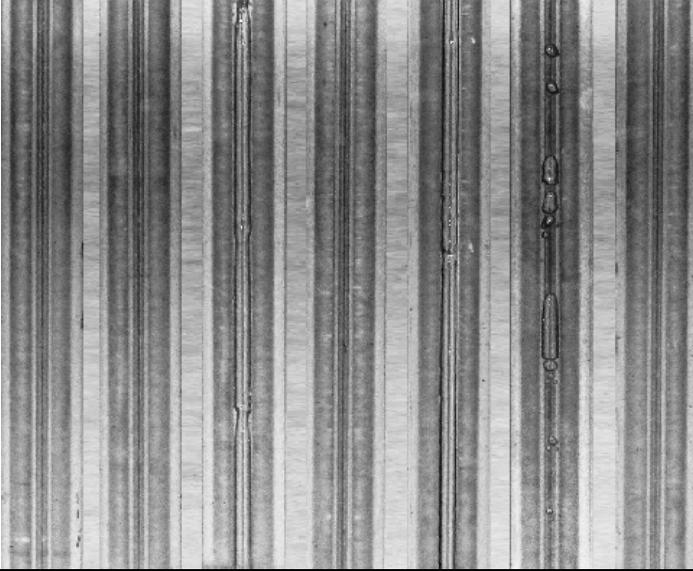
---



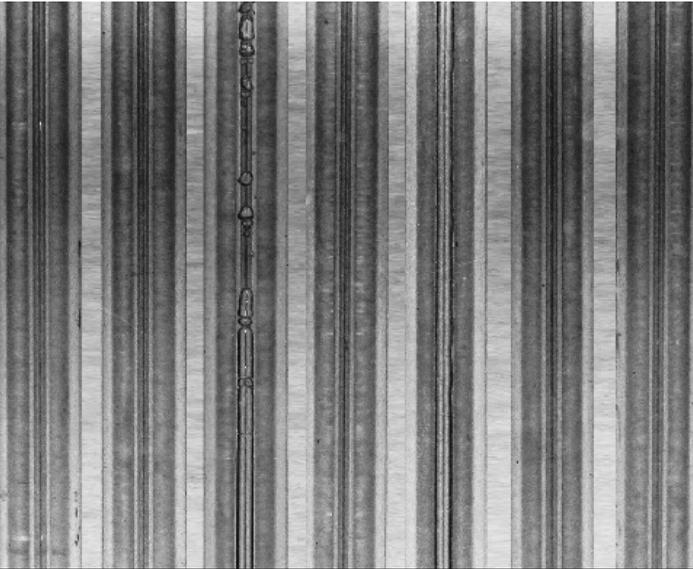

---

*líquido, líquido, anular, líquido, anular, líquido, líquido*

---



*líquido, líquido, anular, líquido, anular, intermit., líquido*



*líquido, líquido, intermit., líquido, anular, líquido, líquido*

Figura V.1: Fotografias do escoamento bifásico ar-água no interior de sete micro-canais para  $G = 50 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$  e  $x = 0,03$ .

A partir de cinco fotografias dos sete micro-canais paralelos, obtêm-se 35 imagens dos micro-canais com diferentes regimes de escoamento, conforme verifica-se na Figura V.1. Portanto, as frações temporais dos regimes de escoamento são definidas considerando o total de imagens obtidas para cada configuração de escoamento bifásico testada, como pode ser verificado na Tabela V.1 que fornece as frações temporais dos regimes de escoamento para  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e  $x = 0,03$ .

Tabela V.1: Frações temporais dos regimes de escoamento bifásico ar-água para  $G = 50 \text{ kg/m}^2\text{s}$  e  $x = 0,03$ .

Regime de escoamento	Número de micro-canais de ocorrência	Fração temporal de regime de escoamento (%)
Líquido	22	62,9
Intermitente	4	11,4
Vapor	0	0
Anular	9	25,7
Total	35	100