UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

**“ESTUDO DO EFEITO DA INCLINAÇÃO NO ESCOAMENTO
BIFÁSICO EM CANAL RETANGULAR COM DIMENSÕES
CARACTERÍSTICAS DA TRANSIÇÃO ENTRE MICRO- E
MACRO-ESCALA”**

Francisco Antonio Loyola Lavin

SÃO CARLOS

2015

FRANCISCO ANTONIO LOYOLA LAVÍN

**ESTUDO DO EFEITO DA INCLINAÇÃO NO ESCOAMENTO
BIFÁSICO EM CANAL RETANGULAR COM DIMENSÕES
CARACTERÍSTICAS DA TRANSIÇÃO ENTRE MICRO- E
MACRO-ESCALA**

Dissertação apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Gherhardt Ribatski

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.

A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-
SE DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECANICA DA
EESC-USP.

SÃO CARLOS

2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

L923e Loyola Lavin, Francisco Antonio
Estudo do efeito da inclinação no escoamento
bifásico em canal retangular com dimensões
características da transição entre micro-e macro-escala
/ Francisco Antonio Loyola Lavin; orientador Gherhardt
Ribatski. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Térmica e Fluidos -- Escola de Engenharia de São Carlos
da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Perda de pressão. 2. Padrões de escoamento. 3.
Fração de vazio. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Licenciado **FRANCISCO ANTONIO LOYOLA LÁVIN.**

Título da dissertação: "Estudo do efeito da inclinação no escoamento bifásico em canal retangular com dimensões características da transição entre micro-e-macro-escala".

Data da defesa: 16/07/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Marcelo Souza de Castro**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Profa. Dra. **Márcia Barbosa Henriques Mantelli**
(Universidade Federal de Santa Catarina/UFSC)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica:
Prof. Associado **Gherhardt Ribatski**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer inicialmente à minha mãe Tatiana del Rosario Lavin Suazo, por tudo que fez e faz por mim, por me ensinar a ser o homem que sou hoje. Teu exemplo é o melhor ensinamento.

Aos meus irmãos Maria Paula Alarcón Lavin, Felipe Eduardo Loyola, Miguel Ignacio Loyola, Rafael Loyola, Luis Loyola e Diego Loyola pelo incentivo, apoio, ensinamentos, orientações, amizade, entre outras contribuições.

Ao meu pai Francisco Eduardo Loyola Garrido, pelo apoio e carinho para continuar seguindo em frente na constante busca pelo conhecimento.

Ao professor Gherhardt Ribatski, que considero um excelente professor e orientador e, acima de tudo, um grande amigo, sempre auxiliando de uma forma bastante criativa nas incontáveis dúvidas que surgiram durante a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de pós-graduação pelos conhecimentos prestados e esclarecimentos concedidos durante o curso.

Aos colegas e amigos, em especial Cristian Chávez Toro e Daniel F. Sempértegui Tapia, pelos diversos artigos cedidos e discussões sobre escoamento, entre outros assuntos não menos interessantes.

Aos colegas Francisco Júlio do Nascimento, Hugo Leonardo Souza Lara Leão, Tiago Moreira e Fábio Toshio Kanizawa pelas contribuições na realização do presente trabalho.

Aos meus amigos e amigas, Maria Oliveros, Erik, Patricia, Natalia, e muitos outros, que sempre compreenderam a importância do mestrado para mim.

Aos funcionários do Laboratório de Térmica e Fluidos, José Roberto Bogni, Jorge Nicolau dos Santos, Roberto Prata Vieira e Roberto Lourenço pela ajuda na realização deste presente trabalho, pela atenção e compartilhamento de bons momentos de descontração durante esses anos de convivência.

RESUMO

LOYOLA, F. A. **Estudo do efeito da inclinação no escoamento bifásico em canal retangular com dimensões características da transição entre micro- e macro- escala.** 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

A presente dissertação de mestrado envolve o estudo da perda da pressão e dos padrões para escoamentos água/ar em um canal retangular segundo inclinações a partir do plano horizontal de -90° a 90° . Também foi avaliado o efeito nestes parâmetros de rotacionar a seção de testes em torno de seu eixo axial segundo ângulos de 45° e 60° , determinados a partir da condição de suas faces superior e inferior posicionadas horizontalmente. O texto se inicia com a apresentação de um amplo estudo da literatura sobre métodos de previsão de padrões de escoamento e perda de pressão durante escoamentos bifásicos no interior de dutos. Em seguida é descrito o aparato experimental projetado e construído para este estudo. Tal descrição inclui o detalhamento da seção de testes, que consiste em um canal retangular de seção transversal com dimensões de $6,0 \times 6,5 \text{ mm}^2$. Resultados foram levantados para vazões mássicas entre 90 e 760 $\text{kg/m}^2\text{s}$, correspondendo a velocidades superficiais entre 0,03 a 19,42 m/s e 0,1 a 0,76 m/s , para, respectivamente as fases gás e líquido. Mapas de escoamento foram desenvolvidos com base em imagens capturadas por câmera de alta velocidade, e também com base na técnica de agrupamento de dados k-means. Os escoamentos foram classificados segundo os padrões bolhas, intermitente e anular. As características hidrodinâmicas e as transições entre estes padrões foram significativamente alteradas pela inclinação do canal. Constatou-se também significativa influência da rotação em torno do eixo do canal, favorecendo efeitos de estratificação no escoamento. As transições obtidas experimentalmente foram comparadas com os métodos de previsão disponíveis na literatura.

Os métodos de Taitel e Dukler (1976), para escoamento horizontal, e Taitel et al. (1980) para escoamento vertical ascendente, apresentaram as melhores previsões dos dados experimentais. Com o objetivo de estimar a parcela gravitacional da perda de pressão, levantou-se resultados para a fração de vazio superficial avaliada com base na velocidade média de bolhas alongadas e no tratamento de imagens no caso do escoamento em bolhas. Resultados de perda de pressão por atrito foram comparados com vinte métodos de previsão da literatura. As correlações de Mishima e Hibiki (1996) e Zhang et al. (2010) proporcionaram as melhores previsões para escoamento horizontal. Para escoamentos inclinados, comparou-se 25 métodos da literatura para a determinação da perda de pressão por atrito com os resultados de perda de pressão experimentais, com a perda de pressão gravitacional estimada considerando 20 métodos para a fração de vazio superficial. Desta análise constatou-se que a combinação dos métodos de Mishima e Hibiki (1996) e Zhang et al. (2010) para a previsão da parcela de perda de pressão devido ao atrito e o método de Spedding e Chen (1984) para previsão da fração de vazio superficial, utilizado para a determinação da parcela gravitacional, proporcionam previsões satisfatórias dos dados experimentais.

PALAVRAS CHAVE: perda de pressão, padrões de escoamento, fração de vazio, escoamento bifásico.

ABSTRACT

LOYOLA, F. A. **Study of the effect of inclination on two-phase flow in a rectangular channel with micro to macro scale characteristics dimensions**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

The present dissertation concerns a study on pressure drop and flow patterns for air/water flows inside a rectangular channel positioned according to inclination angles, relative to the horizontal plane, from -90° to 90° . The effects on flow patterns and pressure drop of rotating the test section relative to its longitudinal axis according to angles of 45° and 60° are also evaluated. Initially, a broad review of the literature concerning experimental studies and predictive methods for flow pattern and pressure drop inside channels is presented. Then, the experimental facility developed for this study is described. In this description, the test section, consisting of a rectangular channel with cross-sectional area of $6.0 \times 6.5 \text{ mm}^2$ is detailed. Experimental data were obtained for mass velocities from 90 to 760 $\text{kg/m}^2\text{s}$, corresponding to gas and liquid superficial velocities from 0.03 to 19.4 m/s and from 0.1 to 0.76 m/s, respectively. Flow patterns maps were developed based on the following approaches: analyses of two-phase flow images from a high speed video camera; and using the *k-means* clustering algorithm based on pressure drop and optical signals. The bubbly, intermittent and annular flow patterns were characterized. From the analyses of the data, it was found that the flow pattern transitions are significantly affected by the flow inclination and channel rotation. Two-phase flow stratification effects are enhanced by rotating the channels. Among the flow pattern predictive method evaluated in the present study, Taitel and Dukler (1976), for horizontal channels, and Taitel et al. (1980), for upward flow, provided the best predictions of the data obtained in the present study. In order of estimating the gravitational parcel of the pressure drop, superficial void fraction results were obtained based on the mean velocity of elongated bubbles, for intermittent flow, and on the image processing

of bubbles, for bubbly flow. Experimental results for frictional pressure drop were compared against 20 predictive methods available in the literature. The methods of Mishima e Hibiki (1996) and Zhang et al. (2010) performed the best for horizontal flows. The frictional pressure drop predictions were also evaluated for inclined flows by comparing the measured total pressure drop against the corresponding calculated values based on the combination of 25 frictional pressure drop predictive methods and the gravitational parcel of pressure drop estimated according to 20 predictive methods for superficial void fraction. From this analysis, it was found that the combination of Mishima e Hibiki (1996) and Zhang et al. (2010) methods for frictional pressure drop with the method of Spedding e Chen (1984), for void fraction, used to determine the gravitational parcel, provide satisfactory predictions of the experimental data.

KEY WORDS: pressure drop, flow patterns, void fraction, two-phase flow.

NOMENCLATURA E ACRÔNIMOS

SÍMBOLOS

UNIDADES

α	Fração de vazio superficial.	Adimensional [-]
$\omega = \max\left(\frac{s}{w}, \frac{w}{s}\right)$	Razão entre lados s e w da seção retangular.	Adimensional [-]
D	Diâmetro.	[m]
D_H	Diâmetro hidráulico do canal retangular.	[m]
ρ	Densidade.	[kg/m ³]
$\dot{m}$	Vazão mássica.	[kg/s]
G	Velocidade mássica.	[kg/ m ² s]
Q	Vazão Volumétrica.	[m ³ /s]
S	Razão de escorregamento.	Adimensional [-]
μ	Viscosidade dinâmica (ou absoluta).	[Pa•s]
ν	Viscosidade cinemática.	[m ² /s]
u	Velocidade in situ.	[m/s]
j	Velocidade superficial.	[m/s]
x	Título de vapor ou fração de vapor.	Adimensional [-]
β	Fração Volumétrica.	Adimensional [-]
ϕ	Inclinação do canal em relação ao plano horizontal.	[°]
θ	Rotação axial do canal, em relação com faces superior e inferior posicionadas horizontais.	[°]
σ	Tensão Superficial	[N/m]
ξ	Parcela de resultados com erro entre $\pm 30\%$	[%]
η	Erro médio absoluto	[%]

SUBÍNDICES

<i>L</i>	Fase líquida
<i>G</i>	Fase Gasosa
<i>TP</i>	Mistura Bifásica (Two Phase)

PARÂMETROS ADIMENSIONAIS

$Re = \frac{u \cdot L}{\nu} = \frac{G \cdot L}{\mu}$	$\frac{\text{Forças Inerciais}}{\text{Forças Viscosas}}$	Reynolds
$We = \frac{\rho \cdot u^2 \cdot L}{\sigma}$	$\frac{\text{Forças Inerciais}}{\text{Forças Tensão Superficial}}$	Weber
$Eo = \frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot L^2}{\sigma}$	$\frac{\text{Forças Empuxo}}{\text{Forças Tensão Superficial}}$	Eötvös
$Bo = \frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot D^2}{\sigma}$	$\frac{\text{Forças Empuxo}}{\text{Forças Tensão Superficial}}$	Bond
$Fr = \frac{u}{\sqrt{g \cdot L_c}}$	$\frac{\text{Forças Inerciais}}{\text{Forças Gravidade}}$	Froude
$Ca = \frac{\mu_L u}{\sigma}$	$\frac{\text{Forças Viscosas}}{\text{Forças Tensão Superficial}}$	Capilaridade
$Co = \sqrt{\frac{\sigma}{D^2 g (\rho_L - \rho_G)}}$	$\frac{\text{Forças Tensão Superficial}}{\text{Forças Empuxo}}$	Confinamento

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Padrões de escoamento em canal vertical caracterizado por Cheng et al. (2008) a partir de estudos da literatura.....	32
Figura 2.2 Padrões de escoamento em canal horizontal caracterizado por Cheng et al. (2008) a partir de estudos da literatura.....	32
Figura 2.3 Padrões de escoamento caracterizados por Milan et al. (2013) para tubo vertical descendente com diâmetro de 8,8 mm para água/ar,	34
Figura 2.4 Padrão Estratificado em tubo inclinado, Garcia (2006).....	36
Figura 2.5 Mapa de escoamento baseado no método de Taitel e Dukler (1976) para canal horizontal.	37
Figura 2.6 Mapa de padrões de escoamento segundo o método de Taitel et al. (1980) para canais verticais ascendentes.....	38
Figura 2.7 Mapa de escoamento baseado no método de Barnea et al. (1982) para canal vertical descendente.	39
Figura 2.8 Efeito da inclinação da tubulação na fração de vazio segundo Beggs e Brill (1973) apud Ghajar e Bhagwat (2014) em escoamento água/ar.	48
Figura 2.9 Comparação de espessura de filme segundo Usui e Sato (1989) com métodos de previsão da literatura.	50
Figura 2.10 Comparação de métodos de avaliação da mistura homogênea para água/ar.	53
Figura 2.11 Comparação de métodos de avaliação da mistura homogênea para títulos de vapor elevados.	53
Figura 2.12 Método de Wojtan et al. (2004) para previsão de padrões de escoamento em água/ar para $G=300 \text{ kg/m}^2$	60
Figura 2.13 Gradiente de pressão estimados segundo métodos de previsão para água/ar, $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $D_H=6,24 \text{ mm}$	63
Figura 2.14 Gradiente de pressão estimados segundo métodos de previsão, para água/ar, $G=700 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $D_H=6,24 \text{ mm}$	64
Figura 3.1 Mapa de escoamento para canal retangular em múltiplas inclinações, Ali et al. (1993).....	74
Figura 3.2 Mapa de escoamento para canal retangular horizontal com lado maior do canal posicionado verticalmente, Ali et al. (1993).	75
Figura 3.3 Comparação entre os mapas para padrões de escoamento de Chen et al. (2009), Mandhane et al. (1974) e Coleman e Garimella (1999).	76
Figura 3.4 Mapa de escoamento proporcionado por Mishima et al. (1993) para canal retangular $40 \times 1,07 \text{ mm}^2$ e $40 \times 2,4 \text{ mm}^2$	77
Figura 3.5 Comparação entre os mapas para padrões de escoamento de Wölk et al. (2000), Yang et al. (2010) e Li et al. (2014).	78
Figura 3.6 Velocidade da bolha alongada para diferentes inclinações do canal, Bhusan et al. (2009).....	79
Figura 3.7 Efeito da inclinação na forma da bolha alongada para canal retangular de $D_H= 3,53 \text{ mm}$ com lado maior posicionado verticalmente, Bhusan et al. (2009).	80
Figura 3.8 Efeito da inclinação na forma da bolha alongada para canal retangular de $D_H= 3,53 \text{ mm}$ com lado maior posicionado horizontalmente, Bhusan et al. (2009).	81
Figura 3.9 Velocidade da bolha em função da velocidade da mistura para canal inclinado 60° em relação ao plano horizontal, Bhusan et al. (2009).....	81
Figura 3.10 Efeito da inclinação do canal e de θ na velocidade da bolha, Hamaguchi (2003).	82
Figura 3.11 Representação esquemática do ascendo de líquido por efeito de tensão superficial.	83
Figura 3.12 Bolha alongada. Kaichiro e Ishii (1984).	85
Figura 3.13 Comparação entre métodos de previsão desenvolvidos para canais reduzidos horizontais, água/ar e $D_H=6,24 \text{ mm}$	87
Figura 3.14 Método de previsão para canal vertical. Hibiki e Mishima (2001), água/ar e $D_H=6,24 \text{ mm}$	88

Figura 3.15 Influência do fator de forma na perda de pressão em canais retangulares segundo os métodos de Ide et al. (2007) e Chen et al. (2007) $D_H=6,24$ mm e $j_L=0,3$ m/s.	92
Figura 3.16 Comparação de métodos de previsão de perda de pressão da literatura propostos para canais retangulares, $D_H=6,24$ mm, $\omega = 1,08$ e $G=300$ kg/m ² s.	92
Figura 4.1 Registro fotográfico da Bancada Experimental.	95
Figura 4.2 Diagrama esquemático do circuito principal.	97
Figura 4.3 Estrutura suporte da seção de teste.	99
Figura 4.4 Ilustração esquemática da estrutura de suporte da seção de testes.	100
Figura 4.5 Ilustração da fixação dos pares de suportes angulares.	100
Figura 4.6 Sistema de inclinação da seção de teste para duas posições.	101
Figura 4.7 Esquema da rotação da seção de teste baseado em suporte angular ajustável.	102
Figura 4.8 Placas de acrílico usinadas com laser.	103
Figura 4.9 Relevô superficial seção de teste avaliada com incremento de 40x.	103
Figura 4.10 Ilustração da seção de teste.	104
Figura 4.11 Detalhe da conformação da seção de teste.	104
Figura 4.12 Detalhe da seção transversal da entrada/saída de fluido.	105
Figura 4.13 Detalhe da seção transversal na tomada de pressão.	105
Figura 4.14 Diagrama esquemático da seção de testes.	106
Figura 4.15 Ilustração da seção em corte do conector intermediários com rosca.	107
Figura 4.16 Detalhe das conexões da seção de teste.	107
Figura 4.17 Dispositivo de vedação dos conectores intermediários.	107
Figura 4.18 Misturador baseado em meio poroso e injeção radial de ar.	110
Figura 4.19 Diagrama esquemático do circuito secundário.	111
Figura 4.20 Esquema da instalação de sensores de pressão diferencial e absoluta.	113
Figura 4.21 Instalação do transdutor de pressão diferencial.	114
Figura 4.22 Ilustração esquemática da instalação dos termopares T_1 , T_2 e T_4	115
Figura 5.1 Efeito da umidade relativa na variação da densidade do ar.	123
Figura 5.2 Sinal do laser binária filtrada e suavizada em função do tempo.	127
Figura 5.3 Determinação do defasamento dos sinais laser por correlação cruzada.	127
Figura 5.4 Comparação da velocidade da bolhas obtida por câmera de alta velocidade e por correlação cruzada entre as sinais de laser.	128
Figura 5.5 Imagem do escoamento para canal horizontal, $j_G=0,1283$ m/s e $j_L=0,1953$ m/s.	128
Figura 5.6 Imagem do escoamento processada.	129
Figura 5.7 Imagem do escoamento dividida em 26 seções transversais.	129
Figura 5.8 Perfil de fração de vazio superficial em canal horizontal para $j_G=0,1283$ m/s e $j_L=0,1953$ m/s.	130
Figura 5.9 Distribuição do banco de dados segundo o título de vapor.	133
Figura 5.10 Distribuição do banco de dados segundo a fração volumétrica.	133
Figura 5.11 Distribuição do banco de dados segundo a velocidade mássica.	133
Figura 5.12 Distribuição do banco de dados segundo os Reynolds das Fases.	134
Figura 5.13 Perda de pressão em escoamento monofásico.	135
Figura 5.14 Comparação entre previsões e resultados experimentais de perda de pressão.	136
Figura 5.15 Comparação de resultados experimentais para condições similares levantadas com intervalos de 177 dias.	137
Figura 6.1 Comparação entre mapa para canal horizontal desenvolvido através de método subjetivo e segundo método k-means, $\theta = 0^\circ$	140
Figura 6.2 Comparação entre mapa para canal inclinado 30° desenvolvido com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means, $\theta = 0^\circ$	141
Figura 6.3 Ilustração dos padrões de escoamento em canal horizontal e inclinado segundo ângulos de 30° para $\theta = 0^\circ$. (a) $j_G=0,3187$ m/s e $j_L=0,1436$ m/s e (b) $j_G=0,3088$ m/s e $j_L=0,1436$ m/s.	141
Figura 6.4 Escoamento intermitente em canal inclinado 60° e $\theta = 0^\circ$ para $j_G=0,302$ m/s e $j_L=0,1436$ m/s.	141

Figura 6.5 Comparação entre mapa para canal inclinado segundo ângulos de 60° desenvolvido com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means, $\theta = 0^\circ$.	142
Figura 6.6 Comparação entre mapa desenvolvido para canal inclinado 90° com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means.	143
Figura 6.7 Comparação entre mapa de escoamento para canal horizontal e ascendentes segundo método k-means.	144
Figura 6.8 Comparação entre mapa desenvolvido para canal inclinado -90° com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means.	145
Figura 6.9 Comparação entre mapa desenvolvido para canal inclinado -60° com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means.	145
Figura 6.10 Comparação entre mapa desenvolvido para canal inclinado -60° com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means.	146
Figura 6.11 Mapa para canal inclinado -90° com método subjetivo e segundo método k-means.	147
Figura 6.12 Comparação entre transições para canal horizontal e descendentes segundo método k-means.	148
Figura 6.13 Efeito da rotação axial segundo um ângulo $\theta = 45^\circ$ nos padrões de escoamento e nas transições entre eles para canal horizontal.	149
Figura 6.14 Escoamento anular em canal horizontal para $\theta = 45^\circ$. $j_G=11,47$ m/s e $j_L=0,3051$ m/s.	150
Figura 6.15 Ilustração da variação da altura do escoamento com a rotação do canal.	150
Figura 6.16 Efeito da rotação axial segundo um ângulo $\theta = 60^\circ$ nos padrões de escoamento e nas transições entre eles para canal horizontal.	151
Figura 6.17 Comparação entre transições caracterizadas segundo o método k-means para escoamento horizontal para distintos ângulos θ .	151
Figura 6.18 Efeito da rotação axial θ nos padrões de escoamento para um canal inclinado segundo ângulo de -30° para linhas (transições segundo k-means), símbolos e imagens correspondendo a $\theta=45^\circ$.	152
Figura 6.19 Escoamento anular em canal inclinado -30° para $\theta=45^\circ$. $j_G=0,6528$ m/s e $j_L=0,1953$ m/s.	153
Figura 6.20 Comparação dos mapas de padrões para escoamento horizontal e $\theta=0^\circ$ levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.	153
Figura 6.21 Comparação dos mapas de padrões para escoamento vertical ascendente levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.	154
Figura 6.22 Comparação dos mapas de padrões para escoamento inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta=0^\circ$ levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.	155
Figura 6.23 Comparação dos mapas de padrões para escoamento inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta=0^\circ$ levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.	156
Figura 6.24 Comparação dos mapas de padrões para escoamento vertical descendente levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.	157
Figura 6.25 Resultados de $\alpha 3$ em função de α obtidos por processamento de imagens.	161
Figura 6.26 Variação da fração de vazio superficial com o tempo ao longo de uma região de 17 mm de comprimento no escoamento ascendente com $j_G= 0,1758$ m/s e $j_L= 0,2504$ m/s.	162
Figura 6.27 Variação temporal da fração de vazio superficial em regiões fixas do escoamento $x/L=16,13\%$, $x/L=32,26\%$ e $x/L=48,39\%$.	162
Figura 6.28 Velocidade da bolha alongada para canal horizontal.	163
Figura 6.29 Comparação de resultados experimentais com métodos de previsão da literatura para $j_L = 0,4$ m/s.	164
Figura 6.30 Variação do gradiente de pressão com j_G para canal horizontal e G próximo de 200 kg/m ² s.	166
Figura 6.31 Gradiente de pressão em canal horizontal para G próximo a 420 kg/m ² s.	167
Figura 6.32 Gradientes de pressão em canal horizontal para j_L entre $0,09$ e $0,76$ m/s.	167
Figura 6.33 Gradientes de pressão para ângulos θ igual a 0° e 45° com G próximo de 200 kg/m ² s (símbolos preenchidos $\theta = 0^\circ$, símbolos vazados $\theta = 45^\circ$).	168
Figura 6.34 Gradientes de pressão para ângulos θ igual a 0° e 60° com G próximo de 200 kg/m ² s.	168

Figura 6.35 Gradientes de pressão para ângulos θ igual a 0° e 60° com G entre 250 e 315 kg/m ²	169
Figura 6.36 Gradientes de pressão para ângulos θ igual a 0° e 60° com G entre 360 e 430 kg/m ²	169
Figura 6.37 Efeito do ângulo θ no gradiente de pressão para G próximo de 600 kg/m ² s e escoamento horizontal.	170
Figura 6.38 Efeito do $\phi \geq 0^\circ$ no gradiente de pressão total para G próximo de 200 kg/m ² s.	171
Figura 6.39 Gradientes de pressão por atrito estimados a partir da estimativa de fração de vazio superficial segundo o método homogêneo.....	173
Figura 6.40 Efeito do $\phi \leq 0^\circ$ no gradiente de pressão total para G próximo de 200 kg/m ² s.....	173
Figura 6.41 Gradientes de pressão para canal inclinado $\phi = 30^\circ$ para j_L entre 0,09 e 0,76 m/s.....	174
Figura 6.42 Gradientes de pressão para canal horizontal e inclinado $\phi = 30^\circ$	175
Figura 6.43 Gradientes de pressão para $\phi = 60^\circ$ e $\theta = 0^\circ$	175
Figura 6.44 Gradientes de pressão para $\phi = 90^\circ$	176
Figura 6.45 Gradientes de perda de pressão para $\phi = -90^\circ$	177
Figura 6.46 Gradientes de perda de pressão gravitacional para $\phi = -90^\circ$	177
Figura 6.47 Gradientes de perda de pressão para $\phi = -60^\circ$	178
Figura 6.48 Gradientes de perda de pressão para $\phi = -30^\circ$	178
Figura 6.49 Efeito do ângulo θ nos gradientes de pressão de canais inclinados com G próximo a 200 kg/m ² s.	179
Figura 6.50 Efeito do ângulo θ nos gradientes de pressão de canais inclinados com G próximo de 400 kg/m ² s.	179
Figura 6.51 Gradientes de pressão de canal horizontal e inclinado 60° com G próximo de 200 kg/m ² s...	180
Figura 6.52 Comparação entre resultados experimentais e previstos segundo Mishima et al. (1993) para canal horizontal e $\theta = 0^\circ$	182
Figura 6.53 Comparação entre resultados experimentais e previstos segundo Zhang et al. (2010) para canal horizontal e $\theta = 0^\circ$	182
Figura 6.54 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal horizontal para $\theta = 0^\circ$ para $j_L=0,3051$ m/s.....	183
Figura 6.55 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 0^\circ$. Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Barcozy (1966).....	198
Figura 6.56 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado 60° para $\theta = 0^\circ$. Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Smith (1969).....	199
Figura 6.57 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado 90° . Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Rouhani e Axelsson (1970).	199
Figura 6.58 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado -90° . Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Turner e Wallis (1965).....	200
Figura 6.59 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal horizontal para $\theta = -90^\circ$ para $j_L=0,3051$ m/s. Fração de vazio estimada segundo Turner e Wallis (1965).....	211
Figura 6.60 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal horizontal para $\theta = -90^\circ$ para $j_L=0,3051$ m/ s. Fração de vazio estimada segundo Usui e Sato (1989).....	212
Figura 6.61 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado -60° . Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Usui e Sato (1989).	212
Figura 6.62 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado -30° . Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Usui e Sato (1989).	213
Figura A.1 Interface do programa para aquisição de dados e monitoramento do aparato experimental.	227
Figura A.2 Programa para aquisição de dados em LabView	228

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Estudos de padrões para escoamento descendente em tubos verticais.	35
Tabela 2.2 Correlações e valores sugeridos na literatura para u_{GJ} e C_0	44
Tabela 2.3 Métodos de previsão da fração de vazio baseados na razão de escorregamento.	47
Tabela 2.4 Correlações para viscosidade da mistura homogênea.....	52
Tabela 2.5 Valores do parâmetro C.	56
Tabela 2.6 Critério para determinação do coeficiente B.....	57
Tabela 2.7 Expoentes da correlação de Oliemans et al. (1986), Eq. (2.73).....	62
Tabela 3.1 Critérios de transições entre micro- e macro-escala baseado no número de Confinamento.	69
Tabela 3.2 Estudos de padrões de escoamento em canais retangulares horizontais e verticais em escoamento adiabático.....	71
Tabela 3.3 Métodos de previsão de perda de pressão por atrito em canais de retangulares de dimensões reduzidas.	89
Tabela 3.4 Coeficientes da correlação de Lee e Lee (2001).	91
Tabela 4.1 Propriedades do de acrílico.	102
Tabela 4.2 Estimativas de incerteza nos parâmetros medidos.....	117
Tabela 4.3 Estimativas de incerteza nos parâmetros medidos.....	118
Tabela 5.1 Descrição do banco de dados levantados.	132
Tabela 6.1 Avaliação dos métodos de previsão de padrões de escoamento para canal horizontal com classificação baseado no método k-means.....	158
Tabela 6.2 Avaliação dos métodos de previsão de padrões de escoamento para canal horizontal com classificação baseado em visualizações.	158
Tabela 6.3 Avaliação dos métodos de previsão de padrões de escoamento para canais inclinados com classificação baseada no método k-means.....	158
Tabela 6.4 Avaliação dos métodos de previsão de padrões de escoamento para canais inclinados com classificação baseada em visualizações.	159
Tabela 6.5 Avaliação do método de Barnea et al. (1982) na previsão de padrões de escoamentos descendentes com classificação baseada no método k-means.....	159
Tabela 6.6 Avaliação do método de Barnea et al. (1982) na previsão de padrões de escoamentos descendentes com classificação baseada em visualizações.....	159
Tabela 6.7 Comparação entre valores de fração de vazio superficial e volumétrica levantados experimentalmente e diferenças em relação as previsões através de métodos da literatura.....	160
Tabela 6.8 Parâmetros do “drift flux model” obtidos por regressão linear.	163
Tabela 6.9 Estimativa das parcela gravitacionais e de atrito segundo o método homogêneo.	172
Tabela 6.10 Parâmetros estatísticos resultantes da avaliação dos métodos de previsão de Δp_{ATRITO} para canal horizontal.....	181
Tabela 6.11 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).....	184
Tabela 6.12 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 45^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).....	186
Tabela 6.13 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).....	188
Tabela 6.14 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).....	190
Tabela 6.15 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 45^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).....	192

Tabela 6.16 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).....	194
Tabela 6.17 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 90° ($\xi[\%]/\eta[\%]$).	196
Tabela 6.18 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -90° ($\xi[\%]/\eta[\%]$).....	201
Tabela 6.19 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -60° para $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$). ...	203
Tabela 6.20 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$). ...	205
Tabela 6.21 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 45^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$)...	207
Tabela 6.22 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$)...	209
Tabela B.1 Fator de Atrito tipo Fanning em escoamento desenvolvido.	230
Tabela B.2 Valores de $c(w)$. Fator geométrico Po	231
Tabela C.1 Dispositivos para geração de escoamento bifásico.	232

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
NOMENCLATURA E ACRÔNIMOS	13
SUBÍNDICES	14
PARÂMETROS ADIMENSIONAIS	14
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
SUMÁRIO	21
1. INTRODUÇÃO	25
1.1. OBJETIVOS.....	27
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	27
2. FUNDAMENTOS E DEFINIÇÃO DE TERMOS	29
2.1. INTRODUÇÃO	29
2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	29
2.2.1. PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO.....	29
2.2.2. PADRÕES DE ESCOAMENTO	32
2.2.3. PADRÕES DE ESCOAMENTO SEGUNDO MÉTODOS OBJETIVOS.....	40
2.2.3.1. MODELOS CINEMÁTICOS	41
2.2.4. ESCOAMENTO ANULAR DESCENDENTE	49
2.2.5. PERDA DE PRESSÃO	50
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	65
3.1. INTRODUÇÃO	65
3.2. TRANSIÇÃO ENTRE MICRO- E MACRO-ESCALA.....	65
3.3. PADRÕES DE ESCOAMENTO	70
3.3.1. ESTUDOS EXPERIMENTAIS EM CANAIS RETANGULARES.....	70
3.3.2. MÉTODOS DE PREVISÃO DE PADRÕES DE ESCOAMENTO.....	83
3.4. PERDA DE PRESSÃO	88
4. BANCADA EXPERIMENTAL.....	95
4.1. CIRCUITO PRINCIPAL	96
4.2. ESTRUTURA.....	99
4.3. SEÇÃO DE TESTE	102

4.4.	MISTURADOR.....	109
4.5.	CIRCUITO SECUNDÁRIO.....	111
4.6.	SISTEMA DE FORNECIMENTO DE AR COMPRIMIDO	112
4.7.	INSTRUMENTAÇÃO	112
4.8.	ESTIMATIVAS DE INCERTEZAS	117
5.	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	119
5.1.	INTRODUÇÃO.....	119
5.2.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	119
5.3.	REDUÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	122
5.4.	CLASSIFICAÇÃO DE PADRÕES DE ESCOAMENTO	130
5.5.	DESCRIÇÃO DO BANCO DE DADOS	132
5.6.	VALIDAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	134
6.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	139
6.1.	PADRÕES DE ESCOAMENTO	139
6.1.1.	EFEITO DA INCLINAÇÃO	139
6.1.2.	EFEITO ROTAÇÃO	149
6.1.3.	COMPARAÇÕES COM MÉTODOS DA LITERATURA	153
6.2.	FRAÇÃO DE VAZIO	160
6.2.1.	ESTIMATIVAS SEGUNDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS.....	160
6.2.2.	ESTIMATIVAS BASEADAS NA VELOCIDADE DE BOLHAS LONGADA	163
6.3.	PERDA DE PRESSÃO	165
6.3.1.	PERDA DE PRESSÃO EM CANAL HORIZONTAL.....	165
6.3.2.	EFEITO DA ROTAÇÃO DO CANAL θ PARA ESCOAMENTOS HORIZONTAIS .	167
6.3.3.	PERDA DE PRESSÃO EM CANAIS INCLINADOS	170
6.3.4.	EFEITO DA ROTAÇÃO PARA ESCOAMENTOS INCLINADO	178
6.3.5.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM MÉTODOS DE PREVISÃO.....	180
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	215
7.1.	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	215
7.2.	CONCLUSÕES	216
7.3.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	217
8.	REFERÊNCIAS.....	219
9.	ANEXOS	227
	APÊNDICE A	227

APÊNDICE B	229
APÊNDICE C	232

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A utilização de canais de dimensões reduzidas pode proporcionar processos de transferência de calor mais eficientes contribuindo para o desempenho de todo o sistema térmico. Aplicações de canais com dimensões reduzidas se verificam no resfriamento de dispositivos eletrônicos (MEMS, microprocessadores, lasers de alta potência), trocadores de calor em sistemas de refrigeração e condicionamento de ar, bombas de calor e dispositivos microfluídicos. A separação entre eixos de barras combustíveis de 14 mm diâmetro em um reator de água em ebulição (BWR) pode ser da ordem de 19 mm (3/4"), como indica Massoud (2005), o que corresponde a um espaço livre de 4 a 5 mm entre barras no qual a mistura flui.

Dada esta situação, torna-se relevante um maior entendimento do escoamento bifásico no interior de canais com geometrias retangulares e dimensões reduzidas, considerando que efeitos relacionados com a distribuição das fases podem afetar o desempenho do sistema térmico, ou ainda a vida útil de equipamentos, por estarem relacionadas a vibrações induzidas pelo escoamento (Flow Induced Vibration FIV) na estrutura, segundo Álvarez et al. (2013), e ao aumento na taxa de corrosão de tubulações metálicas conforme indicado por Kang et al. (1996).

Wambsganss et al. (1991), Sadatomi et al. (1992) e Ali et al. (1993) reportam influência significativa do ângulo de inclinação do escoamento em relação ao plano horizontal nas transições entre padrões de escoamento para canais retangulares com diâmetros hidráulicos entre 1,5 e 5,5 mm. Inclui-se no presente estudo uma análise da perda de pressão e padrões de escoamento em canais inclinados com escoamento ascendente e descendente. Além disso, Shedd (2001) destaca o aumento da tendência da segregação das fases quando um canal retangular de 15,8 x 15,8 mm² com fases paralelas ao plano horizontal é rotacionado segundo um ângulo de 45° segundo seu eixo longitudinal.

Trocadores de calor compactos do tipo placas possuem canais retangulares e envolvem diâmetros hidráulicos na ordem de 5 mm conforme indicado por Wambsganss et al. (1992). Coleman e Garimella (2003) ressaltam a tendência na indústria de condicionamento de ar da utilização de canais retangulares em condensadores com diâmetros hidráulicos próximos a 5,5 mm.

Inevitavelmente a redução do tamanho dos canais resulta no aumento da perda de pressão por atrito, impactando negativamente o desempenho de sistemas fluido – térmicos. Desta forma faz-se necessário buscar soluções que permitam elevar o coeficiente de transferência de calor. Este desafio torna-se crítico em escoamentos bifásicos, caracterizados por gradientes de pressão superiores aos verificados para escoamentos monofásicos correspondendo a uma maior potência no bombeamento.

Nas últimas décadas, tal cenário motivou a busca pela compreensão das características hidrodinâmicas do escoamento bifásico, e como elas influenciam a perda de pressão e a transferência de calor com reduzido impacto na perda de pressão. Este esforço resultou em número elevado de publicações sobre o tema envolvendo o levantamento de resultados experimentais e o desenvolvimento de modelos e métodos de previsão de perda de pressão para escoamento bifásico.

Destaca-se o estudo de Coleman e Garimella (1999) que verificaram experimentalmente que as linhas de transição entre padrões para um canal retangular de $D_H=5,36$ mm são distintas daquelas observadas em canais circulares de diâmetros superiores a 10 mm.

Dentro deste contexto, no presente estudo construiu-se uma bancada experimental para investigar o escoamento bifásico em um canal retangular com dimensões de $6,0 \times 6,5$ mm², correspondendo a um diâmetro hidráulico de 6,24 mm. Optou-se por tais dimensões por estar na região de transição entre micro- e macro-escala, conforme indicado por Tibiriçá e Ribatski (2015), e o foco deste estudo envolver a caracterização dos padrões de escoamento nestas condições.

Resultados experimentais foram obtidos para escoamento água/ar para sete inclinações em relação ao plano horizontal (0° , 30° , 60° , 90° , -30° , -60° e -90°). Para escoamento com a seção de teste inclinada em ângulos de 0° , 30° , 60° , -30° , -60° resultados também foram obtidos para canal rotacionado em relação ao seu eixo longitudinal em 0° , 45° e 60° . Estes dados foram comparados com métodos de previsão de perda de pressão e padrões de escoamento da literatura.

1.1. OBJETIVOS

O presente estudo tem como objetivo geral investigar o escoamento bifásico em canal retangular de dimensão característica na região de transição entre micro e macro – escala. Ele busca ainda avaliar o efeito da inclinação e rotação axial do canal na distribuição das fases. Para isso são apresentados os seguintes objetivos específicos:

- Projeto, construção e validação de bancada experimental para estudo do escoamento bifásico água/ar;
- Análise da literatura sobre os métodos de previsão de padrões de escoamento e perda de pressão para canais retangulares com diâmetro hidráulico inferior a 8 mm.
- Levantamento de dados experimentais para perda de pressão e padrões escoamento em canais retangulares para canais com inclinações entre -90° e $+90^\circ$ e rotacionado em relação ao eixo longitudinal 45° e 60° .
- Identificação dos padrões de escoamento (i) subjetivamente, com base em imagens do escoamento obtidas através de uma câmera de captura de imagens em alta velocidade (até 100.000 imagens por segundo); (ii) objetivamente, através de análise de sinais característicos do escoamento;
- Análise dos resultados experimentais e comparações com métodos de previsão de padrões de escoamento e perda de pressão disponíveis na literatura;
- Proposição de novos métodos de previsão de perda de pressão e padrões de escoamento caso os métodos disponíveis na literatura forneçam resultados insatisfatórios.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta dissertação encontra-se organizada segundo sete capítulos e três anexos descritos a seguir:

O **Capítulo 2** inclui a apresentação de conceitos básicos e definição dos parâmetros utilizados na caracterização de escoamentos bifásicos.

O **Capítulo 3** apresenta uma análise da literatura sobre estudos experimentais e métodos de previsão de perda de pressão e padrões de escoamento para canais retangulares com diâmetro hidráulico inferior a 8 mm.

O **Capítulo 4** descreve detalhadamente o aparato experimental e seus componentes. Ainda a análise de incertezas dos parâmetros experimentais medidos e estimados a partir dos dados fornecidos pelos respectivos instrumentos.

O **Capítulo 5** apresenta o procedimento experimental e de redução de dados que se adotou. Apresenta ainda o procedimento de validação do aparato experimental.

No **Capítulo 6** apresentam-se os resultados de perda de pressão, as estimativas de fração de vazio superficial e padrões de escoamento. Estes são comparados com os métodos de previsão descritos no capítulo 3.

Finalmente, as conclusões derivadas dos resultados apresentadas no capítulo 6 e da revisão da literatura e recomendações para trabalhos futuros são enumerados no **Capítulo 7**.

No **Apêndice A** se ilustra o programa elaborado para controle, monitoramento e aquisição de dados experimentais.

O **Apêndice B** apresenta um sumário dos métodos de previsão de perda de pressão para escoamento monofásico em canais retangulares.

O **Apêndice C** apresenta um levantamento dos dispositivos utilizados em estudos da literatura para gerar escoamento bifásico envolvendo canais de diâmetro hidráulico reduzidos.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS E DEFINIÇÃO DE TERMOS

2.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta conceitos e definições de termos utilizados na análise de escoamentos bifásicos líquido-gás no interior de dutos, dá-se ênfase aqueles utilizados em condições em que efeitos de transferência de calor são desprezíveis.

2.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.2.1. PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO

Devido as suas características intrínsecas, parâmetros e grandezas particulares, além dos utilizados em escoamentos monofásico, são definidos para caracterizar escoamentos bifásicos. A vazão mássica total é dada pela soma das vazões mássicas das fases líquido e gás segundo a seguinte equação:

$$\dot{m} = \dot{m}_G + \dot{m}_L \quad (2.1)$$

onde os subíndices G e L representam respectivamente as fases gás e líquido. A razão entre as vazões mássicas de gás e total é denominada de título de vapor x , ou fração mássica da fase gás, sendo dado por:

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_L + \dot{m}_G} \quad (2.2)$$

No caso de escoamentos bifásicos com mudança de fase utiliza-se o título de vapor termodinâmico, definido como:

$$x_T = \frac{i - i_L}{i_G - i_L} \quad (2.3)$$

onde i é a entalpia local da mistura, i_L e i_G e são as respectivas entalpias das fases líquida e gasosa avaliadas no estado saturado. No caso de equilíbrio termodinâmico, as Eqs. (2.2) e (2.3) fornecem resultados similares.

De forma análoga a vazão mássica, define-se a velocidade volumétrica total dada pela soma das vazões volumétricas das fases.

$$Q = Q_G + Q_L \quad (2.4)$$

A velocidade mássica de cada fase, também denominada de fluxo mássico, é definida como a razão entre a vazão mássica respectiva e a área da seção transversal ao escoamento.

$$G_G = \frac{\dot{m}_G}{A} \quad (2.5)$$

$$G_L = \frac{\dot{m}_L}{A} \quad (2.6)$$

A velocidade mássica total é dada pela soma da velocidade mássicas das fases.

$$G = G_G + G_L \quad (2.7)$$

Em escoamentos bifásicos define-se também as velocidades superficiais, ou fluxo volumétrico, das fases dadas por:

$$j_G = \frac{Q_G}{A} \quad (2.8)$$

$$j_L = \frac{Q_L}{A} \quad (2.9)$$

As velocidades superficiais j_G e j_L correspondem as velocidades de uma das fases fluindo através da área transversal A . A velocidade superficial da mistura J é dada pela soma das velocidades superficiais das componentes.

A média temporal, para uma determinada posição ao longo do duto, da razão entre a parcela de área da seção transversal ocupada pela fase gasosa e a área transversal total é denominado de fração de vazio superficial e é dada como se segue:

$$\alpha_2 = \frac{A_G}{A_L + A_G} \quad (2.10)$$

a fração de vazio superficial será denominada neste texto como α . Defini-se também a fração de vazio cordal α_1 como a média temporal da razão entre os comprimentos ocupados da parcela da corda ocupada pela fase gás e seu comprimento total dada conforme a seguinte equação:

$$\alpha_1 = \frac{L_G}{L_L + L_G} \quad (2.11)$$

De forma análoga, defini-se a fração de vazio volumétrica como a média temporal, para um determinado comprimento de duto, da razão entre volume ocupado por gás e o volume total:

$$\alpha_3 = \frac{\forall_G}{\forall_L + \forall_G} \quad (2.12)$$

Define-se ainda a fração volumétrica β como a razão entre a vazão volumétrica da fase gás e a vazão volumétrica total:

$$\beta = \frac{Q_G}{Q_G + Q_L} \quad (2.13)$$

É possível relacionar as velocidades superficiais das fases gás e líquido com as respectivas velocidades in situ através das seguintes equações:

$$u_G = \frac{Q_G}{A_G} = \frac{j_G}{\alpha} \quad (2.14)$$

$$u_L = \frac{Q_L}{A_L} = \frac{j_L}{1 - \alpha} \quad (2.15)$$

A diferença entre u_G e u_L é a velocidade relativa entre as fases, e a razão entre u_G e u_L se denomina a razão de deslizamento entre as fases. As diferenças de velocidade entre as fases e a velocidade superficial da mistura bifásica denomina-se de velocidade de deslizamento:

$$u_{GJ} = u_G - J \quad (2.16)$$

$$u_{LJ} = u_L - J \quad (2.17)$$

2.2.2. PADRÕES DE ESCOAMENTO

Quando fluidos imiscíveis ou fases distintas de um único fluido escoam em um duto, eles se distribuem segundo configurações ou topologias típicas, denominadas de padrões de escoamento. Em meados do século passado, um número elevado de pesquisadores (principalmente da área nuclear) deram início a estudos visando à classificação dos padrões de escoamentos em canais de diâmetros convencionais (> 10 mm) com base na visualização e caracterização da distribuição das fases. Tais estudos foram motivados pelo fato dos padrões de escoamento influenciarem significativamente a perda de pressão, a transferência de calor e o fluxo crítico de calor. Como resultado destas pesquisas, diversas classificações foram propostas, destacando-se o estudo Simpson et al. (1975) apud Rouhani e Sohal (1983) que reportaram 84 padrões distintos. Entretanto, apesar do elevado número de padrões propostos por estes autores é possível caracterizar padrões principais, cuja identificação por diferentes autores é coincidente. Com base em um extenso estudo da literatura sobre este tema, Cheng et al. (2008) identificaram os principais padrões para escoamentos verticais e horizontais indicados na literatura e ilustrados esquematicamente nas Fig. 2.1 e 2.2.

Figura 2.1 Padrões de escoamento em canal vertical caracterizado por Cheng et al. (2008) a partir de estudos da literatura.

Figura 2.2 Padrões de escoamento em canal horizontal caracterizado por Cheng et al. (2008) a partir de estudos da literatura.

Para escoamentos verticais ascendentes e transferência de calor desprezível, cinco padrões são identificados, descritos a seguir com base nas definições de Collier e Thome (1994).

Bolhas (Bubbly): o escoamento consiste de uma fase líquida contínua contendo bolhas dispersas e discretas de gás. As bolhas, não necessariamente esféricas, são caracterizadas por uma dimensão característica inferior ao diâmetro da tubulação.

Pistonado (Plug): com o aumento da vazão de gás as bolhas colapsam e formam pistões de diâmetro próximo ao da tubulação, e separados entre si por regiões de líquido, podendo ocorrer bolhas dispersas na esteira dos pistões de gás.

Agitante (Churn): neste padrão ocorre destruição intermitente da interface do pistão gasoso, tipicamente irregular. Entretanto, a natureza oscilatória do escoamento ainda se verifica.

Anular (Annular): forma-se um filme de líquido na região periférica do escoamento junto à superfície interna do tubo, com a fase gasosa escoando na região central. Neste padrão o gás pode arrastar gotículas de líquido, enquanto a fase líquida pode conter bolhas.

Névoa (Mist/Spray): com vazões elevadas da fase gás, o filme de líquido junto à parede pode tornar-se instável e ser arrastado de forma dispersa na fase gasosa. Neste padrão não se verifica a presença de um filme líquido junto à superfície do tubo.

Com a inclinação do escoamento em relação a vertical, o efeito da gravidade favorece assimetrias na distribuição das fases. Em escoamentos horizontais, identificam-se os padrões estratificado liso e ondulado, bolhas concentradas na região superior do tubo devido à ação das forças de empuxo, e o padrão pistonado, com os pistões de gás também concentrados na região superior.

No padrão **Estratificado Liso**, por efeito da gravidade, as fases escoam segregadas com o líquido na região inferior e a presença de ondas na interface de amplitude reduzida. Já, para o padrão **Estratificado Ondulado**, embora as fases também encontram-se segregadas devido a efeitos gravitacionais, a amplitude das ondulações se eleva como resultado de uma maior velocidade relativa entre as fases.

Incrementos adicionais na velocidade da fase gasosa provocam ondulações na interface de elevada amplitude que podem alcançar a região superior da tubulação, resultando em bolhas alongadas de gás, padrão denominado de **Pistonado** ou **Bolhas Alongadas**. Este padrão também recebe a denominação de intermitente, pois é caracterizada pela passagem alternada de pistões de gás e líquido.

O padrão **Anular** em canais horizontais é similar ao observado em canais verticais, no entanto, por efeito da gravidade, a espessura do filme líquido não é uniforme ao longo do perímetro do tubo, sendo mínima em sua região superior e máxima na região inferior.

Para escoamentos verticais descendentes verificam-se os padrões em bolhas, intermitente e anular conforme indicado por Usui e Sato (1989) e ilustrado esquematicamente na Fig. 2.3.

Figura 2.3 Padrões de escoamento caracterizados por Milan et al. (2013) para tubo vertical descendente com diâmetro de 8,8 mm para água/ar,.

Para escoamentos verticais descendentes no padrão **bolhas** a fase líquida também se apresenta contínua e a fase gasosa escoar segundo bolhas, não necessariamente esféricas, que tendem a se concentrar na região central do duto, e não próximo à parede como ocorre em escoamentos ascendentes.

No caso de padrões **intermitentes** descendentes a interface curva ocorre na região terminal da bolha enquanto sua região frontal é plana para condições de reduzido j_L . Já para j_L elevado as bolhas alongadas passam a apresentar formato similar ao verificado para escoamento ascendentes.

O padrão **anular** em escoamento descendente para velocidades reduzidas de gás compõe-se de um filme de líquido junto à parede do duto escoando devido a efeitos gravitacionais. Com o aumento da velocidade do gás, no escoamento do filme líquido passa a predominar efeitos de arraste da fase gasosa.

A Tab. 2.1 descreve estudos de padrões de escoamento no interior de dutos desenvolvidos principalmente para escoamento água/ar, exceto pelo estudo de Crawford et al. (1985) que estudou R113. A partir desta tabela se constata que pesquisadores coincidem na classificação dos padrões de escoamento como bolhas, intermitente e anular.

Tabela 2.1 Estudos de padrões para escoamento descendente em tubos verticais.

Autor	Diâmetro [mm]	Fluído	Padrões observados
Golan e Stenning (1969)	38	Água/ar	Anular; Anular-Névoa; Intermitente (Escoamento oscilatório) ; Pistonado e Bolhas.
Oshinowo e Charles (1974)	45,5	Água/ar	Bolhas; Película descendente; Intermitente; Anular.
Spedding e Nguyen (1980)	45	Água/ar	Anular; Pistonado; Bolhas; Escoamento em gotas (Droplet); Intermitente (Pulsating Froth) .
Barnea et al. (1982)	25 /51	Água/ar	Anular; Pistonado; Bolhas.
Yamaguchi e Yamazaki (1984)	40 /80	Água/ar	Anular; Pistonado; Bolhas.
Crawford et al. (1985)	25	R113	Anular; Pistonado; Névoa; Bolhas; Agitante.
Usui e Sato (1989)	16 / 24 / 32 /38	Água/ar	Anular; Pistonado; Bolhas.
Galbiati e Andreini (1992)	0,5 / 1,1 / 2	Água/ar	Bolhas; Filme líquido em queda; Intermitente; Anular.
Fukano e Kariyasaki (1993)	1 / 2,4 / 4,9	Água/ar	Anular; Intermitente; Bolhas.
Kim et al. (2003)	25 / 51	Água/ar	Anular; Agitante; Bolha Alongada; Bolhas.
Milan et al. (2013)	8	Água/ar	Anular ; Intermitente; Bolhas.

Métodos de previsão:

Modelos mecanicistas têm sido desenvolvidos para previsão de padrões de escoamento em canais convencionais. Métodos para canais de reduzidas dimensões têm seus desenvolvimentos, geralmente, baseados em métodos de previsão de canais convencionais. A seguir, apresentam-se os métodos de previsão para canais convencionais:

Canais horizontais

O método de Taitel e Dukler (1976) foi original na previsão de padrões de escoamento com base na análise fenomenológica dos mecanismo físicos dominantes nas transições. Xiao et al. (1990) reporta, com base em seus resultados experimentais, que este método proporciona resultados razoáveis para inclinações entre $\pm 15^\circ$ em relação ao plano horizontal.

Este método considera escoamento estratificado em equilíbrio, como ilustra a Fig. 2.4, sendo aplicadas as equações da quantidade de movimento para cada fase, obtendo-se:

Figura 2.4 Padrão Estratificado em tubo inclinado, Garcia (2006).

obtendo-se a seguinte equação:

$$\chi^2 \left[\left(\tilde{u}_L \tilde{D}_L \right)^{-n} \tilde{u}_L^2 \frac{\tilde{S}_L}{\tilde{A}_L} \right] - \left[\left(\tilde{u}_G \tilde{D}_G \right)^{-m} \tilde{u}_G^2 \left(\frac{\tilde{S}_G}{\tilde{A}_G} + \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{A}_L} + \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{A}_G} \right) \right] - 4Y = 0 \quad (2.18)$$

onde

$$X^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dx} \right)_L}{\left(\frac{dp}{dx} \right)_G} \quad (2.19)$$

$$Y = \frac{(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot \sin(\theta)}{\left(\frac{dp}{dx} \right)_G} \quad (2.20)$$

onde os termos com $\sim$ são dependentes exclusivamente do nível do líquido h_L , desta forma cada (X ; Y) possui única solução para h_L . O parâmetro Y representa a relação entre as forças de gravidade e de pressão, sendo nulo quando a orientação do canal é horizontal, e X corresponde ao parâmetro introduzido por Lockhart e Martinelli (1949). Portanto, conhecido o diâmetro do tubo, os fluidos definidos e as respectivas vazões, é necessária uma equação adicional para a solução. Esta é determinada com base no mecanismo físico responsável da transição.

Neste método, se assume que a partir do padrão estratificado são desenvolvidos padrões segundo bolhas dispersas, intermitente ou anular. Bolhas dispersas são formadas quando as forças turbulentas exercidas pelo líquido ultrapassam as forças de empuxo. Padrões não estratificados (anular ou intermitente) são formados pelo crescimento de ondas na interface. Taitel e Dukler (1976) assumem que a transição de estratificado para intermitente é dominada pela instabilidade de Kelvin - Helmholtz.

A Fig. 2.5 ilustra o mapa de escoamento segundo o método de Taitel e Dukler (1976), desenvolvido para diâmetro hidráulico de 6,24 mm. Observa-se que, para estas condições, o padrão estratificado é identificado na região inferior do mapa correspondendo a valores de j_G inferiores a 3 m/s.

Figura 2.5 Mapa de escoamento baseado no método de Taitel e Dukler (1976) para canal horizontal.

Canais verticais

Taitel et al. (1980) propuseram um método de previsão para canais verticais ascendentes, considerando os seguintes padrões: bolhas, bolhas alongadas, agitante e anular. Segundo eles, a transição entre bolhas dispersas e intermitente ocorre pelos seguintes mecanismos: (i) densidade máxima de bolhas dispersas correspondendo a fração de vazio superficial constante igual a 0,25, (ii) rompimento de bolhas maiores por efeitos de turbulência, e (iii) concentração máxima de bolhas com fração de vazio superficial constante e igual a 0,52. Neste método as linhas de transição entre padrão bolha e intermitente são dadas pelas seguintes relações:

$$j_L = 3j_G - 1,15 \left[g \frac{(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25} \quad (2.21)$$

$$j_G + j_L = 4 \left\{ \frac{D_H^{0,429} \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0,089}}{\left(\frac{\mu_L}{\rho_L} \right)} \left[g \frac{(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right]^{0,446} \right\} \quad (2.22)$$

$$j_L = 0,92 j_G \quad (2.23)$$

A transição para anular ocorre quando a velocidade do núcleo gasoso é suficiente para sustentar as gotículas de líquido. A mínima velocidade é determinada a partir de um balanço de forças entre gravidade e arrasto, resultando que a transição ocorre para velocidades superficiais do gás constantes, dadas pela seguinte relação:

$$j_G = 3,1 \left[\frac{g\sigma(\rho_L - \rho_G)}{\rho_G^2} \right]^{0,25} \quad (2.24)$$

A Fig. 2.6 ilustra as linhas de transição segundo o método de Taitel et al. (1980), onde as expressões das linhas (A), (B) e (C) são dadas respectivamente pelas Eqs. (2.21), (2.22) e (2.23):

Figura 2.6 Mapa de padrões de escoamento segundo o método de Taitel et al. (1980) para canais verticais ascendentes.

Barnea et al. (1982) propôs um método para previsão das transições entre padrões para escoamentos descendentes. Eles se basearam em resultados para escoamento água/ar em tubos de 25,4 mm e 51 mm. Neste método eles assumem que o padrão anular é a estrutura natural do escoamento, ocorrendo segundo uma película de líquido junto à parede escoando devido a efeitos de gravidade e arraste da fase gás junto a interface. Segundo Barnea et al. (1982) a transição de intermitente para anular ocorre quando a parcela de líquido $(1-\alpha)$ no pistão de líquido é superior a duas vezes a parcela de líquido $(1-\alpha)$ em escoamento anular.

A transição de bolhas dispersas para intermitente decorre de mecanismos similares a escoamento ascendente indicado por Taitel et al. (1980). A Fig. 3.8 ilustra o mapa de escoamento proposto por Barnea et al. (1982).

Figura 2.7 Mapa de escoamento baseado no método de Barnea et al. (1982) para canal vertical descendente.

Canais inclinados

Para prever as transições em canais inclinados, Taitel et al. (1980) modificou seu método original incluindo ângulo de inclinação ϕ em relação ao plano horizontal. A transição proposta consiste na modificação da Eq. (2.21) de forma de incluir tal efeito; A equação é dada por:

$$j_L = 3j_G - 1,15 \left[g \frac{(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25} \sin \phi \quad (2.25)$$

A transição intermitente anular ocorre para velocidade superficial da fase gás constante, sendo dada por:

$$j_G = 3,1 \left[\frac{g \sigma (\rho_L - \rho_G) \sin \phi}{\rho_G^2} \right]^{0,25} \quad (2.26)$$

Barnea e Taitel (1986) indicaram que conforme o ângulo de inclinação diminui a partir de 90° , bolhas dispersas tendem a concentrar-se na região superior do tubo, e a transição para intermitente é

favorecida. Desta forma, a Eq. (2.25) não é mais válida a partir de uma inclinação do canal determinada por ângulo ϕ^* em relação ao plano horizontal, sendo este ângulo estimado a partir de um balanço entre as forças de empuxo e arrasto para uma bolha discreta:

$$\frac{\cos \phi^*}{\sin^2 \phi^*} = \frac{3}{4} \cos 45^\circ \frac{u_0^2}{g} \left[\frac{C_L \gamma}{d} \right]^{0,25} \quad (2.27)$$

onde C_L é o coeficiente de arrasto, u_0 a velocidade de subida da bolha relativa a velocidade do líquido, d o diâmetro da bolha e γ o coeficiente de distorção da bolha. Barnea e Taitel (1986) indica que a solução desta equação resulta em ângulos entre 55° e 70° . Para ângulos de inclinação entre ϕ^* e o plano horizontal, a transição entre padrão bolha e intermitente é dada pela Eq. (2.23).

2.2.3. PADRÕES DE ESCOAMENTO SEGUNDO MÉTODOS OBJETIVOS

Até início da década de 70 a maioria dos autores classificaram os padrões de escoamento visualmente com auxílio de registros fotográficos obtidos em seção de teste transparente. Este método é subjetivo, pois depende do julgamento do observador, não implicando em definições precisas.

Hubbard e Dukler (1966) foram pioneiros ao classificar os padrões de escoamento, com base em um sinal elétrico característico do escoamento, analisando neste caso a flutuação do sinal local de pressão na parede do canal. De forma análoga e utilizando o sinal de pressão diferencial, Akagawa et al. (1971), Matsui (1984), Matsui (1986) e Santoso (2012) classificaram escoamentos no interior de dutos, e Kanizawa (2014) em escoamento bifásico externo a banco de tubos.

Jones Jr. e Zuber (1975) caracterizaram os padrões com base na análise da flutuação do sinal de fração de vazio. Eles classificaram o escoamento segundo os padrões bolhas, intermitente e anular com base na função densidade de probabilidade - PDF para o sinal de fração de vazio obtido a partir da atenuação de raios X que atravessam o escoamento. Para a PDF unimodal e com obliquidade positiva o padrão foi classificado como bolhas. Para uma distribuição bimodal o padrão foi classificado como intermitente e quando a PDF é unimodal com obliquidade negativa, se classifica o padrão como anular. De forma análoga a Jones Jr. e Zuber (1975), Matsui et al. (2007) analisou a função de densidade de probabilidade (PDF) da diferença de pressão ao longo de uma tubulação de 7 mm de diâmetro para escoamento água/N₂.

Sempértégui-Tapia (2011) distingue os métodos de classificação em dois grupos: (i) subjetivos baseados em observações visuais e (ii) métodos objetivos baseados na análise de sinais característicos do escoamento. Ele também identificou os seguintes algoritmos para análise de sinais e caracterização

de padrões: redes neurais artificiais, c-means e k-means. Em seu estudo, Sempértégui-Tapia (2011) identificou os padrões a partir de técnicas de agrupamento.

Encontram-se também técnicas de classificação de padrões baseadas na distribuição da densidade espectral. Utilizando esta técnica, Santos (2012) analisou sinais de pressão diferencial em escoamento água/N₂ em um tubo de 24 mm de diâmetro. De forma análoga, Liebenberg e Meyer (2006) classificaram escoamentos com base na análise da distribuição da PSD do sinal de pressão diferencial para condensação para os refrigerantes R22, R407C e R134a em tubos aletados e lisos, e com diâmetro interno próximo de 8 mm.

Métodos objetivos adotam geralmente como sinais característicos de escoamento a pressão local, pressão diferencial e fração de vazio. Encontram-se também classificações de padrões com base na diferença de propriedades elétricas entre fase gasosa e líquida, conforme indicado por Barnea et al. (1980). Estes autores caracterizaram objetivamente padrões de escoamento através da análise da variação da resistividade elétrica, sendo tal técnica aplicada localmente.

Revellin e Thome (2007) e Sempértégui-Tapia (2011) utilizaram na sua classificação sinais de laser atenuados ao atravessar o escoamento, os quais foram captados por sensores fotodiodos. Desta forma, o sinal de laser se relaciona a presença de interfaces nos escoamentos.

2.2.3.1. MODELOS CINEMÁTICOS

Modelos têm sido propostos para descrever o escoamento relativo das fases, razão pela qual são denominados de modelos cinemáticos. Estes modelos são divididos nos seguintes grupos: (i) aqueles que consideram o perfil de velocidade e a distribuição das fases ao longo da seção transversal e (ii) modelos que se baseiam no ajuste de uma correlação para a razão de deslizamento das fases.

Modelos baseados em perfis de velocidade e fração de vazio

O modelo homogêneo, o mais simples modelo cinemático, assume a mistura como um pseudofluido com propriedades intermediárias, ponderadas segundo as parcelas de cada fase na mistura. Neste modelo, a fração de vazio superficial é igual a fração volumétrica.

Este modelo assume que as velocidades das fases são similares e uniformes na seção, e assim é indicado para padrões que se aproximam desta condição, isto é bolhas e névoa em condições de velocidades elevadas para a fase contínua.

Bankoff (1960) apud Collier e Thome (1994) em seu modelo assumiu a velocidade das fases como similares e uniformes, e perfis parabólicos da distribuição de fração de vazio local como da velocidade na seção transversal. Como resultado destas hipóteses ele obteve que a fração de vazio superficial e a fração volumétrica se relacionam linearmente através de uma constante como se segue:

$$\alpha = C_A \beta \quad (2.28)$$

Com base em experimentos para escoamentos água/ar, Armand (1946) propôs C_A igual a 0,833 para pressão de 1 bar. Verifica-se que a constante C_A aumenta com o incremento da pressão.

Posteriormente a Bankoff (1960), Wallis (1969) propôs um modelo que considera as fases com velocidades distintas, no entanto seus valores são uniformes ao longo da seção transversal. No método de Wallis (1969) a fração de vazio se relaciona com a fração volumétrica segundo a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \frac{(1-\alpha)u_{GL}}{J}} \quad (2.29)$$

onde a velocidade relativa u_{GL} é função da velocidade de ascensão de uma bolha em um meio infinito, conforme proposto por Harmathy (1960), dada pela seguinte equação:

$$u_{GL} = u_{\infty} (1 - \alpha)^{n-1} \quad (2.30)$$

Com base numa análise de seus dados, Wallis (1969) propôs um expoente n igual a 2.

Zuber e Findlay (1965) propuseram um modelo no qual a velocidade das fases e a distribuição de fração de vazio na seção são não uniformes, resultando em um modelo cinemático genérico. Denomina-se este modelo na literatura por “drift flux model” e ele é dado por:

$$u_G = C_0 J + \overline{u_{GJ}} \quad (2.31)$$

Esta relação, escrita em termos da fração de vazio superficial e da fração volumétrica, é dada por:

$$\alpha = \frac{\beta}{C_0 + \frac{\overline{u_{GJ}}}{J}} \quad (2.32)$$

Os parâmetros empíricos C_0 e $\overline{u_{GJ}}$ são denominados respectivamente de coeficiente de distribuição de fases e velocidade média de deslizamento ponderada pela fase gás. O parâmetro C_0

reflete não uniformidades das distribuições de velocidade e a fração de vazio na seção transversal do canal. Já, $\overline{u_{GJ}}$ está relacionada à velocidade relativa média entre a fase gás e a velocidade da mistura. Ambos os parâmetros são definidos considerando α_2 e j de forma local, como segue:

$$C_0 = \frac{\overline{\alpha_2 j^2}}{\overline{\alpha_2^2 j^2}} \quad (2.33)$$

$$\overline{u_{GJ}} = \frac{\overline{j_G - \alpha_2 j^2}}{\overline{\alpha_2^2 j^2}} \quad (2.34)$$

onde o operador matemático $\overline{}$ é uma média espacial cujo domínio de integração é a seção transversal do duto. Os parâmetros C_0 e $\overline{u_{GJ}}$ são geralmente determinados mediante a regressão linear da curva u_G em função de J , sendo C_0 o coeficiente angular da reta e $\overline{u_{GJ}}$ a intercepção com o eixo das ordenadas.

A geometria do canal influencia o parâmetro C_0 . Em geral o parâmetro de distribuição apresenta valores superiores para seções não circulares. Resultados experimentais levantados na literatura por Ishii (1977) indicam que para canais circulares C_0 varia entre 1 e 1,25, enquanto para canais retangulares entre 1,2 e 1,4.

Conforme indicado por Kolev (2005) o parâmetro de distribuição possui valores elevados para distribuição de fração de vazio local concentrada na linha central do duto, até 1,5. Já para um perfil de distribuição concentrado na região próximo da parede do duto, o coeficiente de distribuição é 1. Combinando as Eqs. (2.13) e (2.32) tem-se a seguinte relação entre a fração de vazio superficial e o título de vapor:

$$\alpha = \frac{x}{\rho_G} \left[C_0 \left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L} \right) + \frac{\overline{u_{GJ}}}{G} \right]^{-1} \quad (2.35)$$

A Tab. 2.2 apresenta métodos propostos na literatura para a previsão de C_0 e $\overline{u_{GJ}}$ em canais convencionais como função das propriedades dos fluidos, da geometria do canal e do padrão de escoamento. De uma maneira geral estes métodos indicam a redução de $\overline{u_{GJ}}$ e C_0 conforme aumenta ρ_G/ρ_L . Segundo os métodos de previsão apresentados na Tab. 2.2, o parâmetro C_0 independe do diâmetro do canal, já $\overline{u_{GJ}}$ e função do diâmetro apenas para alguns dos métodos listados. Apenas o método de Woldesemayat e Ghajar (2007) considera o efeito da inclinação do canal nos parâmetros $\overline{u_{GJ}}$ e C_0 .

Tabela 2.2 Correlações e valores sugeridos na literatura para $\overline{u_{GJ}}$ e C_0 .

Autores	Condições Experimentais	Padrão de Escoamento	C_0	$\overline{u_{GJ}}$
Griffith (1963) apud Hibiki e Mishima (2001)	Canal retangular vertical água/vapor. $6,1 \leq D_H \leq 51,8$ mm	Bolhas alongadas	-	$\left(0,23 + 0,13 \frac{s}{w}\right) \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_G) g w}{\rho_L^2}}$
Wallis (1969) apud Collier e Thome (1994)	Tubo vertical	Bolhas isoladas	1	$1,53 \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25} (1 - \alpha)^2$
Zuber e Findlay (1965) apud Collier e Thome (1994)	Tubo Vertical $\frac{JD}{\nu_L} > 8000$	Bolhas alongadas	1,2	$0,35 \left[\frac{g (\rho_L - \rho_G) D}{\rho_L} \right]^{0,5}$
Rouhani e Axelsson (1970)	Tubo Horizontal	Todos os padrões	$1 + 0,12(1 - x)$	$1,18(1 - x) \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25}$
Ishii (1977)	Correlação a partir de dados literatura para tubos verticais e horizontais para Freon-22, água/vapor e água/ar, com diâmetros entre 6 mm e 168 mm.	Bolhas Bolhas alongadas	$1,2 - 0,2 \sqrt{\rho_G / \rho_L}$	$\sqrt{2} \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25} (1 - \alpha)^{1,75}$
	Correlação a partir de dados literatura de canais retangulares verticais e horizontais para água/vapor, R-11 e N ₂ -NaK, diâmetro hidráulico variando entre 11 e 19 mm.	Bolhas Bolhas alongadas	$1,35 - 0,35 \sqrt{\rho_G / \rho_L}$	$\sqrt{2} \left[\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25} (1 - \alpha)^{1,75}$
	Canal Circular e $\rho_G / \rho_L \ll 1$	Anular	$1 + \frac{1 - \alpha}{\alpha + 4 \sqrt{\rho_G / \rho_L}} \approx 1$	$\left(\frac{1 - \alpha}{\alpha + 4 \sqrt{\rho_G / \rho_L}} \right) \left[J + \sqrt{\frac{(\rho_L - \rho_G) g D (1 - \alpha)}{0,015 \rho_L}} \right]$
França e Lahey Jr (1992)	Tubo Horizontal; diâmetro 19 mm; água/ar.	Pistonado	≈ 1	0,16
	$0,2 \leq j_L \leq 2,7$	Bolhas alongadas Estratificado ondulado e anular	1,2 1	-0,2 $0,2 + \frac{2,5(j_L - 0,005)}{0,265}$

Tabela 2.2 (Continuação) Correlações e valores sugeridos na literatura para $\overline{u_{GJ}}$ e C_0 .

Autores	Condições Experimentais	Padrão de Escoamento	C_0	$\overline{u_{GJ}}$
Collier e Thome (1994)	Tubo Horizontal $\frac{JD}{\nu_L} > 3000$	Bolhas alongadas	1,2	0
Corradini (1997)	-	Agitante	1-1,3	Sem recomendação (Função do Fluido)
Hibiki e Ishii (2003)		Bolha Alongada Agitante		$0,37 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)D}{\rho_L} \right]^{0,5}$ $\sqrt{2} \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)D}{\rho_L} \right]^{0,5}$
Goda et al. (2003)	Tubo descendente água/ar, água/vapor. $16 \leq D_H \leq 102,3$	Todos os padrão	$C_0 = \begin{cases} 0,0214J^* + 0,772 + (-0,0214J^* + 0,228)\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} & , J^* \leq 20 \\ \left(0,2e^{-0,00848J^*+20} + 1\right) - 0,2e^{-0,00848J^*+20}\sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} & , J^* > 20 \end{cases} ;$ $J^* = \frac{J}{\sqrt{2} \left[\frac{\sigma g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25}}$	$\sqrt{2} \left[\frac{\sigma g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25}$
Woldesemayat e Ghajar (2007)	Tubos inclinados entre 0° e 90° para água/ar, água/gás natural e querosene/ar. $12,7 \leq D_H \leq 102,26$ mm	Todos os padrões	$\beta \left[1 + (1 - \beta) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,1} \right]$	$2,9 \left[\frac{gD\sigma(1 + \cos \theta)(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L^2} \right]^{0,25} \cdot [1,22 + 1,22 \sin \theta]^{\frac{P_{atm}}{P_{fluido}}}$

Modelos baseados na relação de deslizamento

A partir das equações da continuidade escritas para cada fase é possível relacionar a fração de vazio superficial como uma função da razão de deslizamento entre as velocidades in situ das fases segundo a seguinte equação:

$$\alpha = \frac{1}{1 + S \frac{\rho_G}{\rho_L} \frac{(1-x)}{x}} \quad (2.36)$$

Métodos de previsão de fração de vazio têm correlacionado esta razão de deslizamento S para determinar a fração de vazio. Smith (1969) apud Winkler et al. (2012) apresenta um ajuste para S assumindo escoamento anular com arrasto de líquido pela fase gás, e considerando duas fases (fase líquida e uma fase de mistura homogênea) escoando com energias cinéticas similares.

De forma análoga, para escoamento anular com o centro escoando segundo uma mistura homogênea, Chisholm (1973) apud Winkler et al. (2012) apresenta uma correlação da razão de deslizamento assumindo perda de pressão similar na fase líquida e na mistura homogênea.

Baseado também no ajuste de uma correlação da razão de deslizamento a partir de dados experimentais, um método para previsão da fração de vazio superficial foi proposto por Permoli et al. (1971).

Butterworth (1975) analisou a expressão $(1 - \alpha)/\alpha$ considerando os seguintes métodos de previsão de fração de vazio: modelo homogêneo, de Zivi (1964), de Turner e Wallis (1965), de Lockhart e Martinelli (1949), de Thom (1964) e de Barcozy (1966). Como resultado de sua análise, estes métodos foram expressos da seguinte forma:

$$\frac{1 - \alpha}{\alpha} = A \left(\frac{1 - x}{x} \right)^P \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^Q \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^R \quad (2.47)$$

onde o coeficiente A e os expoentes P , Q e R são constantes, sendo que os três últimos variam entre 0 e 1. A Tab. 2.3, elaborada neste estudo, apresenta um sumário dos métodos de previsão de fração de vazio da literatura expressos segundo a Eq. (2.47).

Nela constata-se que o expoente P varia entre 0,64 e 1, onde em seis correlações adotou o valor 1, o que indica elevada influência na fração de vazio superficial da razão entre as vazões mássicas. Esta razão pode ser obtida para velocidades mássicas das fases distintas, não considerando o efeito da velocidade mássica. Apenas os métodos de Permoli et al. (1971), Ide e Fukano (2005) e Kanizawa e Ribatski (2014) consideram o efeito da velocidade mássica através do parâmetro A .

Por outro lado o efeito da razão entre viscosidades é apenas marginal, pois o expoente R varia entre 0 e 0,18, exceto pelo método de Zhao et al. (2000) segundo o qual $R = 0,875$.

Vale destacar que nenhum dos métodos inclui efeitos de inclinação do escoamento, apenas Kanizawa e Ribatski (2014) consideram o efeito da orientação do escoamento ao proporem correlações distintas para escoamentos verticais ascendentes e horizontais.

Tabela 2.3 Métodos de previsão da fração de vazio baseados na razão de escorregamento.

Correlação	A	P	Q	R	Comentários
Homogêneo	1	1	1	0	
Armand (1946)	$\frac{1/C_A - \beta}{1 - \beta}$	1	1	0	$C_A \approx 0,833$ para água/ar próximo da pressão atmosférica.
Lockhart e Martinelli (1949)	0,28	0,64	0,36	0,07	Proposta por Butterworth (1975) a partir dos dados originais de Lockhart e Martinelli (1949).
Zivi (1964)	1	1	0,67	0	Baseado no princípio da mínima geração de entropia.
Thom (1964)	1	1	0,89	0,18	Baseada em experimentos água/vapor em tubos horizontais e verticais.
Turner e Wallis (1965)	1	0,72	0,4	0,08	Assume fases escoando em tubos separados sem interagir.
Barcozy (1966)	1	0,74	0,65	0,13	Experimentos água/ar e Hg/N ₂ .
Smith (1969)	$e + (1 - e) \sqrt{\frac{\rho_L / \rho_G + e \frac{1 - x}{x}}{1 + e \frac{1 - x}{x}}}$	1	1	0	O parâmetro “e” é a fração de líquido em forma de gotas que é arrastada pela fase gasosa. Experimentalmente se ajustou $e = 0,4$.
Permoli et al. (1971)	$1 + 1,578 \text{Re}_L^{-0,19} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0,22} \left(\frac{y}{1 + yF_2} - yF_2 \right)$ $y = \frac{x\rho_L}{(1 - x)\rho_G}$ $F_2 = 0,0273 \text{We}_L \text{Re}_L^{-0,51} \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{-0,08}$	1	1	0	Também denominada correlação CISE (Center for information, Studies, Experiences). Inclui efeitos da velocidade mássica. $\text{Re}_L = \frac{GD}{\mu_L}$; $\text{We}_L = \frac{G^2 D}{\rho_L \sigma}$
Chisholm (1973)	$\sqrt{1 - x \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L}}$	1	1	0	Aprimoramento do método de Barcozy (1966).

Tabela. 2.3 (Continuação) Métodos de previsão da fração de vazio baseados na razão de escorregamento.

Correlação	A	P	Q	R	Comentários
Spedding e Chen (1984)	2,22	0,65	0,65	0	Baseada em experimentos água/ar para canal horizontal e vertical.
Zhao et al. (2000)	$\alpha^{-0,125}$	0,875	0,875	0,875	Correlação de dados experimentais levantados da literatura.
Ide e Fukano (2005)	$1,86 \cdot 10^3 E\ddot{o}^{0,75} Fr_{IDE}^{0,5} Re^{-1,03} Ca^{0,17}$ $Fr_{IDE} = \frac{J}{\sqrt{gD}}; Re = \frac{GD}{\mu_M};$ $Ca = \frac{\mu_M J}{\sigma}; E\ddot{o} = \frac{gD_H^2 (\rho_L - \rho_G)}{\sigma}$	1	1	0	Correlação para canais retangulares com inclinação horizontal e vertical, β fração volumétrica. $\mu_M = 0,57 \mu_L \sqrt{\frac{\beta}{1-\beta}}$
Kanizawa e Ribatski (2014)	$K^{0,33} = \begin{cases} 1,021 \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{-0,37} Fr_{KR}^{-0,092} & \text{Horizontal} \\ 14,5 \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{-1,33} We^{0,222} & \text{Vertical} \end{cases}$ $We = \frac{G^2 D}{(\rho_L - \rho_G) \sigma}; Fr_{KR} = \frac{G^2}{(\rho_L - \rho_G)^2 g D}$	0,66	0,33	0	Modificação do método de Zivi (1964) baseado na não uniformidade dos perfis de velocidade e da distribuição das fases. Correlacionou-se o parâmetro K com base em 3200 dados coletados na literatura.

A Fig. 2.8 ilustra o efeito do ângulo de inclinação do canal ϕ em relação ao plano horizontal.

Figura 2.8 Efeito da inclinação da tubulação na fração de vazio segundo Beggs e Brill (1973) apud Ghajar e Bhagwat (2014) em escoamento água/ar.

onde β é a fração volumétrica. Estes resultados experimentais para água/ar foram levantados por Beggs (1972) para canas circulares e diâmetro variando entre 25,4 mm e 38,1 mm.

Observa-se na Fig. 2.4 que para canais em escoamento ascendente com ϕ variando entre 0° e 90° a fração de vazio decresce com o aumento progressivo do ângulo de inclinação, até atingir um valor mínimo, sendo relacionado este comportamento com o aumento da velocidade de Ascenso das bolhas alongadas. A partir desta inclinação a fração de vazio muda sua tendência e aumenta com incrementos adicionais do θ até atingir um máximo local para escoamento vertical. Para escoamento descendente com θ variando entre 0° até -90° , a fração de vazio superficial inicialmente se eleva com a redução do ângulo θ passando por um valor máximo e a partir deste, decresce progressivamente, até atingir um valor mínimo local para escoamento vertical descendente.

2.2.4. ESCOAMENTO ANULAR DESCENDENTE

Usui e Sato (1989) desenvolveram um método de previsão de fração de vazio superficial para escoamento anular em canal descendente. Este método se baseia em um balanço de forças de pressão, de atrito e gravitacionais nas fases do escoamento anular. Segundo os autores, a fração de vazio em escoamento anular depende da velocidade superficial do líquido e do ângulo de inclinação do canal em relação ao plano horizontal ϕ . A fração de vazio superficial é dada como segue:

$$\alpha = 1 - \left(2c_w Fr_L^2 \sin \phi \right)^{7/23} \quad (2.48)$$

onde c_w é um coeficiente empírico, igual a 0,005, e Fr_L é o número de Froude, dado segundo a seguinte equação:

$$Fr_L^2 = \frac{j_L^2}{gD(\rho_L - \rho_G) / \rho_L} \quad (2.49)$$

A Fig. 2.9 ilustra uma comparação da espessura do filme líquido estimada segundo métodos da literatura e a partir da Eq. (2.50) com a fração de vazio calculada segundo Usui e Sato (1989).

$$\alpha = 1 - \frac{4\delta}{D} \quad (2.50)$$

Figura 2.9 Comparação de espessura de filme segundo Usui e Sato (1989) com métodos de previsão da literatura.

Os métodos da literatura considerados são para escoamento em película descendente em placas planas. Na Fig. 2.9 constatam-se resultados razoavelmente próximos.

2.2.5. PERDA DE PRESSÃO

O gradiente de perda de pressão total para um escoamento é dado pela soma de três parcelas segundo a seguinte equação:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TOTAL} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{GRAVITACIONAL} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ACELERACIONAL} + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{ATRITO} \quad (2.41)$$

A parcela gravitacional, ou queda de pressão gravitacional, corresponde a uma diferença de pressão devido à coluna de líquido e gás, tornando-se nula em escoamento horizontal, dada por:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{GRAVITACIONAL} = g \cdot \sin\phi \left[\alpha \cdot \rho_G + (1-\alpha) \cdot \rho_L \right] \quad (2.42)$$

A parcela aceleracional está relacionada a variações da energia cinética do escoamento, que podem decorrer por mudança de fases ou variações na seção transversal do duto. Calcula-se como:

$$-\left(\frac{dp}{dz}\right)_{ACELERACIONAL} = G^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{x^2}{\alpha \rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_L} \right) \quad (2.43)$$

A queda de pressão aceleracional é comumente considerada desprezível para escoamentos adiabáticos em canais com dimensões convencionais e de seção transversal constante, pois a variação do título de vapor, fração de vazio e densidades das fases são marginais.

A parcela de atrito, denominada perda de pressão por atrito, corresponde a uma perda irreversível de pressão devido a dissipação viscosa. Os métodos para estimativa da perda de pressão por atrito podem ser classificados em quatro grupos: baseados no modelo homogêneo, métodos estritamente empíricos, baseados em multiplicadores bifásicos e baseados em padrões de escoamento.

Estes métodos têm sido desenvolvidos para canais convencionais, no entanto eles geralmente são comparados com resultados obtidos em canais com dimensões características inferiores. Também, métodos para canais de reduzidas dimensões têm seus desenvolvimentos geralmente baseados em métodos para previsão da perda de pressão em canais convencionais.

Modelo homogêneo:

Devido ao fato deste modelo tratar a mistura bifásica como um pseudofluido com propriedades intermediárias ponderadas entre as fases, a perda de pressão é calculada segundo métodos para escoamentos monofásicos, utilizando as seguintes equações:

$$-\frac{dp}{dz} = \frac{2f_{TP}G^2}{\rho_H D_H} \quad (2.44)$$

onde ρ_H é a densidade da mistura em termos do fração em massa segundo a definição de Wallis (1969), dada por:

$$\frac{1}{\rho_H} = \frac{1-x}{\rho_L} + \frac{x}{\rho_G} \quad (2.45)$$

O fator de atrito bifásico f_{TP} , é estimado a partir de correlações tipo Blasius dadas por:

$$f_{TP} = \frac{C}{\text{Re}_{TP}^n} \quad (2.46)$$

onde, as constantes C e n são função da geometria da seção transversal do canal e do regime de escoamento. O Apêndice B apresenta procedimentos para o cálculo de n e C para escoamento monofásico para canais circulares e retangulares. O número de Reynolds, na Eq. (2.33), é baseado no diâmetro hidráulico e definido como:

$$\text{Re}_{TP} = \frac{GD_H}{\mu_{TP}} \quad (2.47)$$

onde μ_{TP} é a viscosidade dinâmica da mistura homogênea. A Tab 2.4 apresenta algumas correlações propostas para calculo de μ_{TP} . Seus resultados são comparados na Fig. 2.10, onde se observam desvios significativos entre os resultados proporcionados por estes métodos, especialmente para títulos intermediários.

Tabela 2.4 Correlações para viscosidade da mistura homogênea.

Autor	Correlação
McAdams et al. (1942) apud Collier e Thome (1994)	$\frac{1}{\mu_{TP}} = \frac{x}{\mu_G} + \frac{1-x}{\mu_L}$
Davidson et al. (1943) apud Collier e Thome (1994)	$\mu_{TP} = \mu_L \left[1 + x \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} - 1 \right) \right]$
Akers et al. (1959) apud Yang e Webb (1996)	$\mu_{TP} = \mu_L \left[(1-x) + x \sqrt{\frac{\rho_L}{\rho_G}} \right]^{-1}$
Cicchitti et al. (1960) apud Collier e Thome (1994)	$\mu_{TP} = x\mu_G + (1-x)\mu_L$
Owens (1961) apud Choi e Kim (2011)	$\mu_{TP} = \mu_L$
Dukler et al. (1964) apud Collier e Thome (1994)	$\mu_{TP} = \rho_H \left[\frac{x\mu_G}{\rho_G} + \frac{(1-x)\mu_L}{\rho_L} \right]$
Beattie e Whalley (1982)	$\mu_{TP} = \beta\mu_G + (1-\beta)(1+2,5\beta)\mu_L$
Lin et al. (1991)	$\mu_{TP} = \frac{\mu_G\mu_L}{\mu_G + x^{1,4}(\mu_L - \mu_G)}$
Garcia et al. (2003)	$\mu_{TP} = \mu_L \frac{\rho_H}{\rho_L}$
Awad e Muzychka (2008)	$\mu_{TP} = \mu_G \frac{2\mu_G + \mu_L - 2(\mu_G - \mu_L)(1-x)}{2\mu_G + \mu_L + (\mu_G - \mu_L)(1-x)}$

Para frações de massa da fase gás nulas, os métodos de previsão da viscosidade da mistura homogênea fornecem uma viscosidade igual a da fase líquida. A Fig. 2.11 ilustra uma região amplificada da Fig. 2.10, indicando que para $x = 1$ os métodos de Davidson et al. (1943), Akers et al. (1959) e Garcia et al. (2003) apresentam viscosidade homogênea diferente da viscosidade do gás.

Figura 2.10 Comparação de métodos de avaliação da mistura homogênea para água/ar.

Figura 2.11 Comparação de métodos de avaliação da mistura homogênea para títulos de vapor elevados.

Métodos estritamente empíricos:

Estes métodos se baseiam no ajuste de coeficientes a uma correlação utilizando um banco de dados experimentais ponderando as perdas de pressão monofásicas das fases gás e líquido segundo o título de vapor. Entre os métodos propostos com base neste procedimento destaca-se a correlação de Müller-Steinhagen e Heck (1986), dada pela seguinte equação:

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{TP} = \left\{A + \gamma[A - B] \cdot x\right\}(1-x)^\lambda + Bx^\lambda \quad (2.48)$$

onde A e B são os respectivos gradientes de pressão monofásicos com fatores de atrito calculados segundo a metodologia de Blasius, e assumindo transição entre regimes para número de Reynolds igual a 1187:

$$A = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0} = 2f_{L0} \frac{G^2}{\rho_L D_H} \quad (2.49)$$

$$B = \left(\frac{dp}{dz}\right)_{G0} = 2f_{G0} \frac{G^2}{\rho_G D_H} \quad (2.50)$$

A partir de um extenso banco de dados composto por 9313 pontos experimentais para tubos, com diâmetros entre 4 mm e 243 mm e fluidos de trabalho incluindo água/ar, água/vapor, água/óleo, R11, R12, R22, Argônio, N₂ e Neon, os coeficientes γ e λ foram ajustados, sendo seus valores iguais a 2 e 3, respectivamente.

A correlação de Müller-Steinhagen e Heck (1986) têm se destacado em estudos que envolvem comparações entre suas previsões e bancos de dados independentes. Sun e Mishima (2009) compararam 11 métodos de previsão com um banco de dados contendo 2092 dados experimentais que incluem como fluido de trabalho R123, R134a, R22, R236ea, R245fa, R404a, R407C, R410a, R507, CO₂ e água/ar, e canais com diâmetro variando entre 0,5 mm a 12 mm. A correlação de Müller-Steinhagen e Heck (1986) foi a que apresentou melhores previsões para escoamentos turbulentos correspondendo as duas fases com Re_{jL} e Re_{jG} superiores a 2000. O método de Müller-Steinhagen e Heck (1986) também apresentou a segunda melhor previsão para refrigerantes halogenados.

Ribatski et al. (2006) avaliaram 12 métodos de previsão com um banco de dados de 913 dados experimentais envolvendo canais únicos e multicanais, com diâmetros hidráulicos entre 0,056 mm e 4,08 mm. As condições experimentais foram para escoamento adiabáticos e diabáticos para fluidos compreendendo R113, R134a, R12, R410a, R22, R404a, R236ea, água/ar, água/N₂, água/ Argônio e água/He. Para esta base de dados, entre os métodos de previsão avaliados o método de Müller-Steinhagen e Heck (1986) apresentou a melhor previsão.

De forma análoga, Felcar e Ribatski (2008) avaliaram um banco de dados levantados na literatura contendo 1892 resultados, eles também verificaram que o método de Müller-Steinhagen e Heck (1986) apresenta melhores previsões entre 17 métodos. A base de dados considerou multicanais e dutos com seções circulares, retangulares e semi-triangulares, inclinados, horizontal e verticalmente e com diâmetros hidráulicos entre 0,1 e 6,25 mm. Os fluidos de trabalho compreendem água, amônia, água/ar, água/N₂, propano, R113, R12, R134a, R22, R236ea, R245fa, R404A e R410A.

Cioncolini et al. (2009) compararam 24 métodos de previsão de perda de pressão com uma base de dados envolvendo 3908 resultados experimentais da literatura para água /argônio, água / N₂, álcool/argônio, água/vapor, R134a e R245fa para tubos de diâmetros entre 0,517 e 31,7 mm. O método de Müller-Steinhagen e Heck (1986), junto com os métodos de Lombardi e Carsana (1992) e o modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o método Cicchitti et al. (1960), foram os que obtiveram melhores previsões

Métodos baseados em multiplicadores bifásicos:

Buscam relacionar a razão entre as perdas de pressão para os escoamentos bifásico e monofásico correspondente, através de uma correlação denominada de multiplicador bifásico.

Neste método, a definição da perda de pressão monofásica do multiplicador pode ser efetuada considerando o escoamento apenas da parcela de uma das fases no mesmo duto ou da mistura bifásica escoando apenas como líquido ou gás. No caso da parcela de líquido da mistura escoando em um duto de mesmas dimensões o multiplicador bifásico é dado por:

$$\phi_L^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz} \right)_{TP}}{\left(\frac{dp}{dz} \right)_L} \quad (2.51)$$

A razão entre os multiplicadores bifásicos relativos as fases gás e líquido escoando isoladamente em um duto de dimensões similares, assumindo ambas fases turbulentas e o fator de atrito dado pela correlação de Blasius define o parâmetro de Martinelli-Lockhart dado pela seguinte relação:

$$\chi_u = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_G} \right)^{0,1} \quad (2.52)$$

Lockhart e Martinelli (1949)

Estes autores foram pioneiros ao apresentar um método de previsão baseado em multiplicadores bifásicos. Eles propuseram seu método baseados em 25.000 resultados experimentais para diâmetros entre 1,49 e 25,83 mm para os fluidos água, óleos, hidrocarbonetos, água/ar, óleo/ar e R12. Originalmente o método consistiu em curvas relacionando ϕ_L^2 e χ , posteriormente Chisholm (1967) estabeleceu uma correlação segundo a Eq. (2.53) e baseada nestas curvas que inclui um parâmetro C, função do regime de escoamento de cada fase, segundo a Tab. 2.5.

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2} \quad (2.53)$$

Tabela 2.5 Valores do parâmetro C.

Regime	Líquido	Gás	C
Laminar – Laminar	$Re_L \leq 1.000$	$Re_G \leq 1.000$	5
Turbulento - Laminar	$Re_L \geq 2.000$	$Re_G \leq 1.000$	10
Laminar - Turbulento	$Re_L \leq 1.000$	$Re_G \geq 2.000$	12
Turbulento - Turbulento	$Re_L \geq 2.000$	$Re_G \geq 2.000$	20

Baseados em comparações experimentais cobrindo uma base de dados ampla contendo mais de 25000 dados da literatura, Whalley e Hewitt (1980) apud Collier e Thome (1994) recomendam o método de previsão de Lockhart e Martinelli (1949) para $G < 100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $\mu_L / \mu_G > 1000$.

Este método tem sido desenvolvido para canais convencionais, no entanto Kim e Mudawar (2013) indicam que geralmente métodos para canais de reduzidas dimensões têm seus desenvolvimentos baseados no método de Lockhart e Martinelli (1949)

Chisholm (1973)

Este método trata-se de uma modificação do método proposto por Chisholm (1967) buscando incluir efeitos da velocidade mássica no multiplicador bifásico. O método, também denominado na literatura inglesa *B-method*, é dado pela seguinte equação:

$$\phi_{Lo}^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) \left[Bx^{0,875} (1-x)^{0,875} + x^{1,75} \right] \quad (2.54)$$

onde o parâmetro B é um coeficiente de ajuste que depende da velocidade mássica G e de Γ conforme a Tab. 2.6.

Tabela 2.6 Critério para determinação do coeficiente B.

Γ	G [kg/m ² s]	B
$\leq 9,5$	≤ 500	4,8
	$500 < G < 1900$	$2400/G$
	≥ 1900	$55/G^{0,5}$
$9,5 < \Gamma < 28$	≤ 600	$520/\Gamma G^{0,5}$
	> 600	$21/\Gamma$
≥ 28		$15000/\Gamma^2 G^{0,5}$

onde

$$\Gamma^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{G0}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L0}} \quad (2.55)$$

Tran et al. (2000) verificaram que este método não proporciona resultados adequados para a perda de pressão por atrito dos refrigerantes R134a, R12 e R113 em tubos com diâmetros de 2,46 e 2,92 mm. Desta forma propôs uma modificação deste método para canais de reduzido diâmetro através da introdução de efeitos de tensão superficial usando o número de confinamento definido por Kew e Cornwell (1997).

Grönnerud (1979)

Este método foi desenvolvido com base em resultados experimentais para R12 e amônia. Nele o multiplicador bifásico é dado pela seguinte relação:

$$\phi_{L0}^2 = 1 + \left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} \left[\frac{\left(\frac{\rho_L}{\rho_G}\right)}{\left(\frac{\mu_L}{\mu_G}\right)^{0,25}} - 1 \right] \quad (2.56)$$

onde

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{Fr} = f_{L0} \left[x + 4 \left(x^{1,8} - x^{10} f_{L0}^{0,5} \right) \right] \quad (2.57)$$

$$f_{l0} = \begin{cases} 1 & Fr_{L0} \geq 1 \\ Fr_{L0}^{0,3} + 0,0055 \left(\ln \frac{1}{Fr_{L0}} \right)^2 & Fr_{L0} < 1 \end{cases} \quad (2.58)$$

O número de Froude é definido como a mistura escoando apenas como líquido no tubo sendo dado por:

$$Fr_{L0} = \frac{G^2}{g \rho_L^2 D_H} \quad (2.59)$$

Ould Didi et al. (2002) a partir de dados experimentais para tubos de 10,92 mm e 12 mm posicionados horizontalmente durante ebulição de R134a, R123, R402A, R404A e R502, avaliou as previsões proporcionadas pelas correlações de Müller-Steinhagen e Heck (1986), Lockhart e Martinelli (1949), Friedel (1979), Chisholm (1973) e Grönnerud (1979). Eles concluíram que os métodos de Grönnerud (1979) e Müller-Steinhagen e Heck (1986) apresentaram as melhores previsões dos dados levantados na literatura.

Friedel (1979)

A correlação proposta por Friedel (1979) é dada por:

$$\phi_{L0}^2 = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L f_{G0}}{\rho_G f_{L0}} + \frac{3,24 \cdot x^{0,78} (1-x)^{0,224} H_{FRIEDEL}}{Fr_{FRIEDEL}^{0,045} We_{FRIEDEL}^{0,035}} \quad (2.60)$$

onde

$$Fr_{FRIEDEL} = \frac{G^2}{g D \rho_H} \quad (2.61)$$

$$We_{FRIEDEL} = \frac{G^2 d}{\sigma \rho_H} \quad (2.62)$$

$$H_{FRIEDEL} = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0,91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0,19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0,7} \quad (2.63)$$

A densidade ρ_H é a densidade da mistura definida na Eq. (2.45). Efeitos gravitacionais são incluídos através do número de Froude ($Fr_{FRIEDEL}$). O número de Weber ($We_{FRIEDEL}$) captura os efeitos de tensão superficial e velocidade mássica.

Este autor desenvolveu seu método baseado em um banco de dados experimentais da literatura contendo 25000 resultados para velocidades mássicas entre 2 kg/m²s e 10333 kg/m²s e diâmetros hidráulicos entre 4 mm e 154 mm incluindo canais retangulares e circulares. Este banco de dados inclui resultados para água/ar, ar/óleo, CH₄/água e CH₄/óleo.

Posteriormente, Friedel (1985) apud Ghajar e Bhagwat (2014) apresentou versão modificada de seu método para escoamentos verticais descendentes, dado por:

$$\phi_{L0}^2 = (1-x)^2 + x^2 \frac{\rho_L f_{G0}}{\rho_G f_{L0}} + \frac{5,7 \cdot x^{0,7} (1-x)^{0,14} H_{FRIEDEL}^*}{Fr_{FRIEDEL}^{0,09} We_{FRIEDEL}^{0,007}} \quad (2.64)$$

$$H_{FRIEDEL}^* = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0,85} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0,36} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0,2} \quad (2.65)$$

Com os fatores de atrito correspondentes a cada fase dados por:

$$f_{L0} = 0,25 \left[0,86859 \ln \left(\frac{Re_{jL}}{1,964 \ln Re_{jL} - 3,8215} \right) \right]^{-2} \quad (2.66)$$

$$f_{G0} = 0,25 \left[0,86859 \ln \left(\frac{Re_{jG}}{1,964 \ln Re_{jG} - 3,8215} \right) \right]^{-2} \quad (2.66)$$

Whalley e Hewitt (1980) apud Collier e Thome (1994) recomendam o método de Friedel (1979) para $G < 2000 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $\mu_L / \mu_G < 1000$.

Métodos baseados em padrões de escoamento:

Também denominados de fenomenológicos, utilizam uma correlação específica de perda de pressão correspondente ao padrão de escoamento.

Moreno Quibén e Thome (2007)

Este modelo apresenta correlações de perda de pressão com base no padrão de escoamento, que é determinado segundo o método de Wojtan et al. (2004) para escoamentos horizontais. Este método resultou do aprimoramento de trabalhos anteriormente executados pelo grupo de pesquisa, liderado pelo Prof. Thome. A classificação dos padrões é baseada em medições dinâmicas da fração de vazio superficial durante ensaios envolvendo R22 e R410a em um tubo de 13,84 mm. Para títulos de vapor inferiores a 0,4, este método distingue 6 padrões de escoamento conforme ilustrado na Fig. 2.12.

Figura 2.12 Método de Wojtan et al. (2004) para previsão de padrões de escoamento em água/ar para $G=300$ kg/m^2 .

As correlações apresentadas por Moreno Quibén e Thome (2007) para cada padrão no mapa da Fig. 2.12 são baseadas em um banco de dados que inclui 1745 dados experimentais envolvendo R134a, R22 e R41a, temperatura de saturação 5°C , para tubos de diâmetro 8 e 13,8 mm posicionados horizontalmente. Segundo este método, a perda de pressão em escoamento anular é calculada com base fase gás:

$$\Delta P_{TP-ANULAR} = 2f_i \left(\frac{L}{D} \right) \rho_G u_G^2 \quad (2.67)$$

onde f_i é o fator de atrito na interface entre gás e o filme líquido, que é correlacionado através de quatro adimensionais. De entre estes, um inclui os efeitos das ondulações na espessura de filme, a razão entre esta espessura e o diâmetro, a razão entre viscosidades de cada fase e o número de Weber definido para incluir efeitos de tensão superficial.

Escoamentos pistonados e intermitentes são tratados de forma similar, sendo a sua perda de pressão interpolada a partir perda de pressão em escoamento anular na transição segundo a fração de vazio superficial:

$$\Delta P_{TP-PISTONADO+INTERMITENTE} = \Delta P_{L0} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{IA}} \right)^{0,25} + \Delta P_{ANULAR} \left(\frac{\alpha}{\alpha_{IA}} \right)^{0,25} \quad (2.68)$$

onde a ΔP_{L0} é a perda de pressão monofásica avaliada com título de vapor zero, α_{IA} (Intermitente m-Anular) é a fração de vazio na transição intermitente anular sendo α determinado segundo o método de Rouhani e Axelsson (1970). ΔP_{ANULAR} é calculada a partir da Eq. (2.68) para o título de vapor atual.

Cioncolini et al. (2009)

Para o desenvolvimento deste método, inicialmente levantou-se um banco de dados envolvendo 3908 resultados experimentais da literatura para água/argônio, água/ N₂, álcool/ argônio, água/vapor, R134a e R245fa e para escoamentos em tubos de diâmetros entre 0,517 mm a 31,7 mm. Do total de dados, 85% são para diâmetros superiores a 3 mm.

Estes autores desenvolveram um método mecanicista para previsão da perda de pressão por atrito para o padrão anular. Neste método, assumem-se similares as perdas de pressão no filme líquido e no centro do escoamento, onde predomina a fase gás. Desta forma, assumindo perda de pressão uniforme ao longo da seção transversal para um determinado comprimento axial, os autores propuseram a seguinte relação para a perda de pressão por atrito:

$$\Delta P_{TP} = 2 \frac{f_{TP}}{\rho_C} \frac{L}{D} G_C^2 \quad (2.69)$$

onde ρ_C e G_C são a densidade e a velocidade mássica do núcleo de gás que contem gotículas de líquido sendo arrastadas, dadas por:

$$G_C = \frac{4\dot{m}}{\pi D_C^2} [x + e(1-x)] \quad (2.70)$$

$$\rho_C = (1-\alpha_C)\rho_L + \alpha_C\rho_G \quad (2.71)$$

Nas equações acima “e” é a fração de líquido, disperso em gotículas na fase gás e α_C é a fração de vazio superficial do núcleo de gás. Esta fração de vazio é estimada a partir da fração de vazio superficial na seção transversal, α , estimada segundo Woldesemayat e Ghajar (2007) e da fração superficial de líquido em forma de gotículas γ , segundo a seguinte equação:

$$\alpha_C = \frac{\alpha}{\alpha + \gamma(1-\alpha)} \quad (2.72)$$

A fração de líquido segundo gotículas no escoamento é calculado segundo a correlação proposta por Oliemans et al. (1986), dada por:

$$\frac{e}{1-e} = 10^{b_0} \rho_L^{b_1} \rho_G^{b_2} \mu_L^{b_3} \mu_G^{b_4} \sigma^{b_5} D^{b_6} j_L^{b_7} j_G^{b_8} g^{b_9} \quad (2.73)$$

onde os coeficientes b_i assumem os valores dados na Tab 2.7.

Tabela 2.7 Expoentes da correlação de Oliemans et al. (1986), Eq. (2.73).

Re_δ	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6	b_7	b_8	b_9
*	-2,52	1,08	0,18	0,27	0,28	-1,8	1,72	0,7	1,44	0,46
$10^2 - 3 \times 10^2$	-0,69	0,63	0,96	-0,8	0,09	-0,88	2,45	0,91	-0,16	0,86
$3 \times 10^2 - 10^3$	-1,73	0,94	0,62	-0,63	0,5	-1,42	2,04	1,05	0,96	0,48
$10^3 - 3 \times 10^3$	-3,31	1,15	0,4	-1,02	0,46	-1	1,97	0,95	0,78	0,41
$3 \times 10^3 - 10^4$	-8,27	0,77	0,71	-0,13	-1,18	-0,17	1,16	0,83	1,45	-0,32
$10^4 - 3 \times 10^4$	-6,38	0,89	0,7	-0,17	-0,55	-0,87	1,67	1,04	1,27	0,07
$3 \times 10^4 - 10^5$	-0,12	0,45	0,25	0,86	-0,05	-1,51	0,91	1,08	0,71	0,21

* Estes expoentes são utilizados independentemente do Re_δ .

A fração superficial de líquido em forma de gotículas γ se relaciona com a fração em massa de líquido e como segue:

$$\gamma = e \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{\rho_G}{\rho_L} \right) \quad (2.74)$$

O diâmetro do núcleo de gás na Eq. (2.70) se calcula a partir da seguinte equação:

$$D_C = D - 2\delta \quad (2.74)$$

onde δ é a espessura do filme líquida, dada por:

$$\delta = \frac{D}{2} \left[1 - \sqrt{\alpha + \gamma - \alpha\gamma} \right] \quad (2.75)$$

Através do teorema dos π de Buckingham e um banco de dados extenso levantado na literatura, Cioncolini et al. (2009) utilizaram 6 adimensionais visando correlacionar o fator de atrito bifásico. Através desta análise eles obtiveram a seguinte correlação para tubos de diâmetros superiores a 3 mm:

$$f_{TP} = 0,172 We_C^{-0,372} \quad (2.76)$$

onde We_C é o número de Weber baseado na região central do escoamento contendo a fase gás e gotículas dispersas. Este número de Weber relaciona efeitos de inércia de tensão superficial, sendo igual a:

$$We_c = \frac{G_c^2 D_c}{\rho_c \sigma} \quad (2.77)$$

Para canais com diâmetros inferiores a 3 mm, o fator de atrito é também função do número de Weber e do número de Reynolds relacionado com o filme líquido Re_δ .

$$f_{TP} = 0,0196 We_c^{-0,372} Re_\delta^{0,318} \quad (2.78)$$

$$Re_\delta = (1-e)(1-x) \frac{GD}{\mu_L} \quad (2.79)$$

Comparação entre os métodos de previsão:

As Figs. 2.13 e 2.14 ilustram a variação do gradiente de pressão com Re_{jG} para distintas velocidades mássicas segundo os métodos de previsão descritos neste capítulo. Observa-se que, para as condições de Re_{jG} avaliadas, inicialmente, a correlação de Friedel (1985) proporciona gradientes de pressão superiores aos demais métodos de previsão. Com acréscimos de j_L o modelo homogêneo com a viscosidade da mistura dada por Awad e Muzychka (2008) passa a proporcionar previsões superiores aos demais. Observa-se também que o gradiente de pressão segundo o modelo homogêneo com a viscosidade da mistura dada por Cicchitti et al. (1960) se eleva substancialmente em relação aos demais com o incremento da velocidade mássica.

Figura 2.13 Gradiente de pressão estimados segundo métodos de previsão para água/ar, $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $D_H=6,24 \text{ mm}$.

Figura 2.14 Gradiente de pressão estimados segundo métodos de previsão , para água/ar, $G=700 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $D_H=6,24 \text{ mm}$.

Os métodos de Grönnerud (1979) e Moreno Quibén e Thome (2007) proporcionam gradientes de pressão inferiores aos demais. Vale destacar que o método de Cioncolini et al. (2009), apesar de ser fenomenológico, apresentou um comportamento similar a os demais, proporcionando tendências e ordem de magnitude dos valores de gradiente de pressão similares. Já o método de Moreno Quibén e Thome (2007) apresentou apenas tendências similares a os outros métodos.

Em relação ao gradiente de pressão proporcionado pelo método de Grönnerud (1979) para $G=300 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $Re_{jG}=6000$, o método de Friedel (1985) apresentou previsões superiores em cerca 65,6%, e o método homogêneo com a viscosidade da mistura dada por Cicchitti et al. (1960) uma diferença de 59,2%, e com viscosidade da mistura segundo Awad e Muzychka (2008) 120%.

Já para $G=700 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $Re_{jG}=14000$, os métodos de Friedel (1985) e homogêneo com a viscosidade da mistura segundo Cicchitti et al. (1960) e Awad e Muzychka (2008), proporcionaram diferenças percentuais de 44,1% , 87% e 57%, em relação ao gradiente de pressão proporcionado pelo método de Grönnerud (1979).

CAPÍTULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura sobre estudos envolvendo escoamentos bifásicos em canais retangulares. Ele se inicia com uma análise dos critérios de transição entre macro-micro-escala. Adicionalmente, são descritos os métodos de previsão de padrões de escoamento e perda de pressão focando em estudos experimentais e métodos de previsão desenvolvidos para escoamentos água/ar em dutos com diâmetro hidráulico reduzidos, desta forma para condições próximas às deste estudo.

3.2. TRANSIÇÃO ENTRE MICRO- E MACRO-ESCALA

Com o decréscimo do diâmetro hidráulico a partir de uma determinada dimensão constata-se desvios significativos do comportamento da perda de pressão, transição entre padrões de escoamento e fração de vazão. Qu et al. (2004) relaciona tais alterações ao crescimento relativo de efeitos de tensão superficial, em relação aos efeitos gravitacionais e inerciais.

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores apresentaram critérios para a transição do escoamento bifásico em micro- e macro-escala, também denominado de transição entre macro- micro-canal. Lowry e Kawaji (1988) apud Wilmarth e Ishii (1994) indicam que tais distinções entre comportamentos ocorrem para diâmetros hidráulicos inferiores a 10 mm. Yue et al. (2004) e Ullmann

e Brauner (2007) denominaram de canais convencionais aqueles com diâmetro superior a 10 mm, e nos quais o escoamento bifásico apresenta comportamentos típicos de macro-escala.

Mehendale et al. (2000) propuseram critérios desprezando os mecanismos físicos relevantes, baseando-se apenas nas tecnologias de fabricação dos canais. Eles propuseram chamar de canais convencionais, aqueles com diâmetro hidráulico superior a 6 mm, macrocanal para diâmetros entre 1 e 6 mm, mesocanal para $0,1 \leq D_H \leq 1$ mm e microcanal para $0,01 \leq D_H \leq 0,1$ mm.

Kandlikar e Grande (2003), além do método de fabricação, consideraram as aplicações dos canais, classificando como convencionais aqueles com diâmetros superiores a 3 mm e minicanais com diâmetro hidráulico entre 0,2 e 3 mm, correspondendo a dimensões típicas de trocadores de calor compactos. Os canais com dimensões inferiores a estes foram classificados considerando condições em que efeitos de rarefação de gases se tornam relevantes, caracterizados através do número de Knudsen. Neste caso, canais com dimensões características entre 0,2 mm e 0,01 mm foram denominados de microcanais, entre 0,01 mm e 0,0001 mm de canais de transição, e no caso de dimensões inferiores, como nanocanais moleculares. Segundo os autores, tais critérios desenvolvidos com base em escoamentos de gás, são utilizados para escoamentos de líquido assim e bifásicos.

Crítérios baseados na predominância de mecanismos físicos também foram propostos. Estes, geralmente se baseiam em uma relação adimensional incluindo o comprimento de Laplace La e a dimensão característica do canal e os números de Eötvös $(D_H/La)^2$ e de Confinamento La/D_H . O comprimento de Laplace considera efeitos de tensão superficial e empuxo, estando relacionado ao desprendimento de uma bolha crescendo junto à superfície. Ele é definido por:

$$La = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_G)}} \quad (3.1)$$

Kew e Cornwell (1997) propuseram que a transição em ebulição convectiva entre condições de micro – e macro escala é consequência dos efeitos de confinamento de uma bolha desprendendo-se da superfície do canal em um meio infinito. Efeitos de confinamento tornam-se significativos para números de confinamento superiores a 0,5. Ullmann e Brauner (2007) indicaram a transição ocorrendo para número de confinamento igual a 0,8. Suo e Griffith (1963) apud Serizawa et al. (2002) propuseram o valor 3,3. Já, Triplett et al. (1999) indicou para números de confinamento igual à unidade.

Efeitos de interação com a parede do canal para caracterizar esta transição foram inicialmente incluídos por Felcar et al. (2007), considerando que estes efeitos estariam relacionados à impossibilidade da ocorrência do padrão estratificado. Estes autores consideraram o efeito da elevação do líquido junto à parede devido às forças capilares predominantes sobre efeitos gravitacionais para

números de Eötvos modificado inferiores a 0,41. O número de Eötvos modificado pelos autores é dado por

$$E\ddot{o} = \frac{g(\rho_L - \rho_G)D_H^2}{\sigma \cos \theta} \quad (3.2)$$

onde θ é o ângulo de contato.

Três critérios distintos foram desenvolvidos por Tibiriçá e Ribatski (2015). O primeiro está baseado na impossibilidade de ocorrer padrão estratificado, baseando-se no máximo diâmetro do tubo que permite a formação um pistão de líquido em condições estáticas. Caso as forças de pressão estáticas sejam superiores às de tensão superficial agindo na linha de contato triplo, o pistão de líquido é instável e têm-se condições de macro - escala. Para um canal circular, a condição de equilíbrio é dada pela seguinte equação:

$$2g(\rho_L - \rho_G) \int_{-D/2}^{D/2} \left(H + D/2 \right) \sqrt{\left(D/2 \right)^2 - H^2} dH = \pi D \sigma \cos \theta \quad (3.3)$$

onde a resolução da integral acima resulta em um número de confinamento de transição igual a $1/2\sqrt{2\cos\theta}$. Outro critério, também baseado na impossibilidade de ocorrer padrão estratificado, considera a elevação H do menisco em um tubo de diâmetro D , mergulhado parcialmente e perpendicularmente em um banho de líquido estagnado, dado por:

$$H_{MENISCO} = \frac{4\sigma \cos \theta}{g(\rho_L - \rho_G)} \quad (3.4)$$

Segundo os autores, para canais com diâmetros superiores que $H_{MENISCO}$, o padrão estratificado é favorecido e têm-se condições de macro – escala. O último critério proposto por Tibiriçá e Ribatski (2015) considera o grau de uniformidade da espessura do filme líquido para escoamento anular, com esse tornando-se uniforme quando a razão entre as forças gravitacionais e de tensão superficial tornam-se inferiores a 0,05 conforme a seguinte equação:

$$\frac{F_{GRAV}}{F_{\sigma}} = \frac{g(\rho_L - \rho_G)D^2}{\sigma} < 0,05 \quad (3.5)$$

Este critério resulta em escoamento em micro-escala para números de confinamento superiores a 4,47.

De forma análoga a Tibiriçá (2011) e publicado posteriormente em Tibiriçá e Ribatski (2015), Ong e Thome (2011) adotaram como critério para a transição entre micro- e macro-escala o grau de uniformidade da espessura de filme para escoamento anular. Eles observaram que para $Co > 1$, a espessura do filme torna-se aproximadamente simétrica sugerindo comportamento em micro - escala. Para $Co < 1$, o escoamento se altera progressivamente até apresentar características de macro-escala para diâmetros correspondentes a $Co \approx 0,3 - 0,4$.

Escoamentos caracterizados por números de confinamento com valores entre 0,3 - 0,4 e 1 se denomina mesoescala. Para esta faixa de números de confinamento, as forças de tensão superficial são progressivamente suprimidas pelas gravitacionais, com o aumento do diâmetro. O critério de Ong e Thome (2011) se destaca por considerar a transição gradual, e não abrupta como os demais critérios.

Para condições de microgravidade, Celata (2008) destaca que os critérios baseados apenas no número de confinamento indicam comportamento de micro-escala, independentemente do diâmetro do canal. Este fato contraria seus resultados em microgravidade, segundo os quais o grau de confinamento da bolha ao se destacar da superfície não depende apenas da geometria do canal e das propriedades do fluido, mas também da velocidade mássica e do título de vapor.

Harirchian e Garimella (2010) propuseram um critério de transição, introduzindo um número de Confinamento modificado denominado de número de Confinamento Convectivo, que é definido como o produto entre o número de Confinamento e o número de Reynolds, assumindo a mistura bifásica escoando como líquido. Desta forma efeitos da velocidade mássica no grau de confinamento das bolhas são capturados. Neste critério a dimensão característica é dada pela raiz da área da seção transversal. A transição ocorre para um número de Confinamento Convectivo igual a 160.

Na Tabela 3.1 são sumarizados os critérios de transição expostos. Ela também fornece os diâmetros de transição para escoamento água/ar a 20°C e pressão atmosférica normal, onde θ é o ângulo de contato.

Para as condições avaliadas, observa-se que o diâmetro de transição proporcionado pelo terceiro critério de Tibiriçá e Ribatski (2015) baseado na uniformidade da espessura do filme líquido é inferior aos demais. Já o critério de Ong e Thome (2011) proporciona um diâmetro de transição superior aos demais. Como se observa, os critérios apresentam dispersão nos valores de transição, que ocorre dentro de uma faixa de 0,61 a 9,71 mm.

Tabela 3.1 Critérios de transições entre micro- e macro-escala baseado no número de Confinamento.

Autor	Co	D _H [mm] para transição	Crítério / Mecanismo físico
Suo e Griffith (1963) apud Serizawa et al. (2002)	3,3	0,83	Forças gravitacionais não tem influência significativa sobre o movimento de bolhas de gás no canal horizontal.
Kew e Cornwell (1997)	0,5	5,45	Efeito de confinamento da bolha.
Triplett et al. (1999)	1	2,73	Comprimento característico (D _H < La)
Ullmann e Brauner (2007)	0,79	3,45	Efeitos de tensão superficial tornam se dominantes.
Felcar et al. (2007)	$\frac{1}{0,64\sqrt{\cos\theta}}$	$\theta = 34^\circ / 1,59$ $\theta = 60^\circ / 1,23$	Supressão do padrão estratificado por efeitos de molhabilidade.
Harirchian e Garimella (2010)	$\frac{Re_{L0,D_c}}{160}$	$G = 300 \text{ kg/m}^2\text{s} \rightarrow 1,2$ $G = 500 \text{ kg/m}^2\text{s} \rightarrow 0,9$ (Circular)	Influência das dimensões do canal (confinamento da bolha) e forças de arrasto que agem na bolha no coeficiente de transferência de calor.
Ong e Thome (2011)	1 0,3	2,73 9,1	Uniformidade da espessura do filme líquido em escoamento anular: forças de tensão superficial e inércia suprimem progressivamente as forças de gravidade.
Tibiriçá e Ribatski (2015)	$\frac{1}{2\sqrt{2}\cos\theta}$	$\theta = 34^\circ - 7,02$ $\theta = 60^\circ - 5,45$	Supressão do padrão estratificado pela formação de um pistão de líquido por efeito de forças de tensão superficial.
Tibiriçá e Ribatski (2015)	$\frac{1}{2\sqrt{\cos\theta}}$	$\theta = 34^\circ - 4,97$ $\theta = 60^\circ - 3,86$	Supressão do padrão estratificado pela elevação do menisco de líquido.
Tibiriçá e Ribatski (2015)	$2\sqrt{5} \approx 4,47$	0,61	Uniformidade da espessura do filme líquido em escoamento anular: forças de gravidade desprezíveis em relação às forças de tensão superficial.

Como indicado por Ribatski (2013), a discussão a respeito da transição entre micro- e macro-escala requer resolver algumas definições fundamentais, por exemplo: se é necessário distinguir uma transição? se a transição ocorre de forma gradual o subitamente?

Ribatski (2013) também recomenda focar os estudos relacionados a este tópico considerando principalmente as características e comportamentos termo-hidráulicos do escoamento que permitam distinguir as condições entre micro- e macro-escala, desta forma proporcionando resultados relevantes para serem incorporados nos modelos que possam ser utilizados como ferramentas em projetos.

3.3. PADRÕES DE ESCOAMENTO

Anteriormente ao trabalho de Taitel e Dukler (1976), métodos de previsão de padrões de escoamento foram baseados em mapas de escoamento, geralmente, envolvendo coordenadas j_G e j_L , que foram desenvolvidos para canais convencionais de geometria circular. Segundo Wilmarth e Ishii (1994), nas pesquisas relacionadas a padrões de escoamento, predominam resultados para canais circulares em relação aos retangulares. Também, canais retangulares apresentam características e transições diferentes das observadas em canais circulares de diâmetros convencionais. Neste cenário, este capítulo trata de estudos envolvendo canais retangulares com dimensões características reduzidas, e de métodos de previsão desenvolvidos para canais de reduzida dimensão característica.

3.3.1. ESTUDOS EXPERIMENTAIS EM CANAIS RETANGULARES

A Tab. 3.2 apresenta uma descrição sistemática de estudos da literatura que apresentam mapas de escoamentos para canais retangulares, envolvendo resultados para diâmetros hidráulicos inferiores a 6 mm, para canais verticais e horizontais respectivamente.

A tabela descreve o método utilizado na identificação dos padrões de escoamento. Também se apresenta a razão entre as dimensões do lado maior e menor do canal definido como fator de forma ($\omega \geq 1$). Distingue-se entre orientação horizontal ou vertical do escoamento, e para escoamento horizontal é indicada uma figura retangular ilustrando o posicionamento do lado maior. Apresentam-se as condições experimentais em que foi desenvolvido o mapa de escoamento, sendo descrito o fluido de testes, as velocidades superficiais da fase gás e líquido e o material da seção de testes.

Verifica-se que uma parcela significativa das pesquisas envolvem fatores de forma significativamente superiores a 1, similares aos trabalhos de Lowry e Kawaji (1988) e Ali et al. (1993), para canais inclinados, horizontais e verticais. Entre os estudo voltados para canais verticais, apenas Ali et al. (1993) analisaram escoamentos descendentes.

Em relação a canais caracterizados por $1 \leq \omega \leq 3$, apenas 5 estudos envolvem diâmetros hidráulicos superiores a 1 mm. Entre estes estudos encontra-se para canal horizontal Coleman e Garimella (1999) e Chen et al. (2009), e para canal vertical os trabalhos de Wölk et al. (2000), Yang et al. (2010) e Li et al. (2014).

Tabela 3.2 Estudos de padrões de escoamento em canais retangulares horizontais e verticais em escoamento adiabático.

Autor	Seção [mm²] x L	D _H / ω	Orientação	Fluidos	Material	j _L [m/s]	j _G [m/s]	Método de Identificação
Lowry e Kawaji (1988) apud Wilmarth e Ishii (1994)	80 x 0,5 x 240	0,99 / 160	Ascendente	Água/Ar	Lucita	0,1 – 8	0,1 - 18	Fotografia e PDF de α
	80 x 1 x 240	1,97 / 80						
	80 x 2 x 240	1,95 / 40						
Ali e Kawaji (1991) apud Wilmarth e Ishii (1994)	80 x 1,465 x 240	2,88 / 54,6	Ascendente	Água/Ar	Lucita	0,2 – 7	0,15 - 16	Fotografia e PDF de α
Wambsganss et al. (1991)	19,05 x 3,18 x 1143	5,45 / 6		Água/Ar	-	0,02 – 2,1	0,049 – 34,53	Fotografia e análise de sinal dinâmica de Pressão
Sadatomi et al. (1992)	80 x 1,465 x 240	2,88 / 54,6		Água/Ar	Lucita	0,19 -6	0,15 - 16	Fotografia e PDF de α
Ali et al. (1993)	80 x 0,778 x 240	1,54 / 102,8						
Sadatomi et al. (1992)	80 x 1,465 x 240	2,88 / 54,6	Ascendente	Água/Ar	Lucita	0,19 - 6	0,15 - 16	Fotografia e PDF de α
Ali et al. (1993)	80 x 0,778 x 240	1,54 / 102,8	Descendente					
Mishima et al. (1993)	40 x 1,07 x 2.000	2,08 / 37,4	Ascendente	Água/Ar	-	0,37 – 2,49	0,09 – 24,35	Radiografia de nêutrons e Câmera
	40 x 2,4 x 2.000	4,53 / 16,7				0,15 - 5,1	0,024 – 2,34	
	40 x 5 x 2.000	8,89 / 10				0,02 – 4,84	0,07 – 0,7	
Wilmarth e Ishii (1994)	2 x 15 x 630	3,53 / 7,5		Água/Ar	Lucita	0,02 – 4,15	0,04 – 15,17	Câmera
Wilmarth e Ishii (1994)	1 x 20 x 630	1,9 / 20	Ascendente	Água/Ar	Lucita	0,1 – 3,26	0,05 – 7,67	Câmera
	2 x 15 x 630	3,53 / 7,5				0,02 – 4,15	0,04 – 15,17	
Fujita (1995)	0,2 x 10 x 450	0,39 / 50		Água/N ₂ e Solução aquosa etanol/N ₂ .	Acrílico e Níquel	0,04–0,8	0,1–14	Fotografia
	0,5 x 10 x 450	0,95 / 20						
	0,7 x 10 x 450	1,3 / 14,3						
	1,2 x 10 x 450	2,14 / 8,3						
	2 x 10 x 450	3,33 / 5						
Coleman e Garimella (1999)	6,38 x 4,62	5,36 / 1,38		Água/Ar	Plástico	0,06 – 3,9	0,13 - 42,5	Câmera
Xu (1999)	12 x 1 x 260	1,85 / 12	Ascendente	Água/Ar	Pyrex	0,056 – 3,72	0,007 – 8,97	Câmera e Fotografias.
	12 x 0,6 x 260	1,14 / 20				0,05 – 3,32	0,034 – 8,16	
	12 x 0,3 x 260	0,59 / 40				0,05 – 3,01	0,1 – 8,89	
Wölk et al. (2000)	6 x 6,2	6,1 / 1	Ascendente	Água/Ar	PMMA	0,45 – 2,73	0,25 – 2,69	Câmera
	7,2 x 5	5,9 / 1,5				0,46 – 2,87	0,18 – 4,57	

Tabela 3.2. (Continuação) Estudos de padrões de escoamento em canais retangulares horizontais e verticais em escoamento adiabático.

Autor	Seção [mm ²] x L	D _H / ω	Orientação	Fluidos	Material	j _L [m/s]	j _G [m/s]	Método de Identificação
Zhao e Li (2003)	1 x 1 x 300	1 / 1	-	Água/Ar	Pyrex	0,1 - 10	0,2 - 7	Câmera
Zhao et al. (2004)								
Qu et al. (2004)	2,032 x 0,406 x 120	0,677 / 5		Água/Nitrogênio	Acrílico	0,04 – 9,85	0,075 – 81,1	Câmera e Fotografia
Satitchaicharoen e Wongwises (2004)	40 x 1 x 1000	1,9 / 40	Ascendente	Água/Ar	Acrílico	0,006 - 2	0,03 - 10	Fotografia
	40 x 2 x 1000	3,8 / 20		Água+glicerol 20%				
	40 x 3 x 1000	5,6 / 13,3		/Ar				
	20 x 2 x 1000	3,6 / 10		Água+glicerol 40%				
	60 x 2 x 1000	3,9 / 30		/Ar				
Waelchli e Rudolf Von Rohr (2006)	0,15 x 0,15 x 380	0,15 / 1		Água/N ₂ ; Etanol/N ₂ ;	Silício	0,025 – 1,2	2,8 - 9	Câmera
	0,25 x 0,15 x 380	0,187 / 1,67		Glicerol-10%/N ₂ e				
	0,35 x 0,15 x 380	0,21 / 2,33		Glicerol-20%/N ₂				
	0,40 x 0,15 x 380	0,218 / 2,67						
Xiong e Chung (2006)	0,213 x 0,206 x 23,6	0,209 / 1,03		Água/N ₂	Silício + coberta de Pyrex	0,02 – 7,13	0,06 – 72,3	Câmera
Xiong e Chung (2007)	0,419 x 0,406 x 23,5	0,412 / 1,03						
	0,63 x 0,615 x 23,8	0,622 / 1,02						
Ide et al. (2007)	9,9 x 1,1 x 1890	1,98 / 9		Água/Ar	Bronze	0,1 – 0,7	0,5 - 15	Fotografia e análise de sinal dinâmico de α .
Kabov et al. (2007)	40 x 1 x 80	1,95 / 40		Água/N ₂	Vidro	0,0004 – 0,024	0,008-15	Câmera
Ide et al. (2007)	1 x 1 x 1042	1 / 1	Ascendente	Água/Ar	Bronze	0,1 – 0,7	0,5 - 15	Fotografia e análise de sinal dinâmico de α .
	2 x 1 x 1254	1,33 / 2						
	5 x 1 x 1543	1,66 / 5						
	9,9 x 1,1 x 1890	1,98 / 9						
Yue et al. (2008)	0,2 x 0,2 x 25,3	0,2 / 1		Água/CO ₂	PMMA	0,02 - 1	0,04 - 60	Câmera
	0,4 x 0,4 x 25,3	0,4 / 1						
	0,5 x 1 x 15	0,667 / 2						
Sowiński e Dziubiński (2008)	15 x 0,65 x 400	1,25 / 23	Ascendente	Água/Ar	Policarbonato	0,0085 – 0,75	0,005 – 7,2	Câmera
	7,5 x 0,73 x 400	1,33 / 10,3						
Chen et al. (2009)	3 x 3	3 / 1		Água/Ar	Acrílico	0,1 – 0,8	1,5 - 8	Câmera
	3 x 6	4 / 2						
	3 x 9	4,5 / 3						

Tabela 3.2. (Continuação) Estudos de padrões de escoamento em canais retangulares horizontais e verticais em escoamento adiabático.

Autor	Seção [mm²] x L	D_H / ω	Orientação	Fluidos	Material	j_L [m/s]	j_G [m/s]	Método de Identificação
Sowiński et al. (2009)	15 x 1,23 x 400	2,27 / 12,2	Ascendente	Água/Ar	Policarbonato	0,008 – 2,3	0,006 – 2,1	Câmera
	15 x 2,31 x 400	4,00 / 6,4						
	15 x 0,65 x 400	1,25 / 23						
	7,5 x 0,73 x 400	1,33 / 10,3						
Yang et al. (2010)	2,5 x 2,5 x 200	2,5 / 1	Ascendente	CMC/ N ₂	Lucita	0,1 - 6	0,1 - 100	Câmera
				PAM/ N ₂				
				XG/ N ₂				
				Água/ N ₂				
Choi et al. (2011a)	0,61 x 0,41 x 60	0,490 / 1,48	□	Água/N ₂	Vidro (hidrofóbico)	0,19 – 0,46	0,066 – 34,1	Câmera e Microscópio
	0,62 x 0,43 x 60	0,507 / 1,43			Vidro (hidrofilico)			
Choi et al. (2011b)	0,510 x 0,47	0,489 / 1,08	□	Água/N ₂	Vidro	0,06 - 1	0,06 - 71	Câmera e Microscópio
	0,680 x 0,410	0,512 / 1,65						
	0,501 x 0,237	0,322 / 2,11						
	0,503 x 0,085	0,145 / 5,91						
Shen et al. (2012)	0,993 x 40 x 2000	1,94 / 40,3	Ascendente	Água/Ar	Acrílico	0,214 – 2,08	0,0755 – 3,18	Fotografia
Elazhary (2012)	20 x 1,87 x 415,5	3,42 / 10,7	□	Água/Ar	Acrílico	0,02 – 0,7	0,04 - 10	Câmera
Zhao et al. (2013)	0,6 x 0,3	0,4 / 2	□	Água/N ₂	PMMA	0,023 – 0,93	0,046 - 23	Câmera
Li et al. (2014)	2 x 0,81 x 2000	1,15 / 2,5	Ascendente	Água/ N ₂	PMMA	0,01 -5	0,1 - 30	Câmera e análise de sinal dinâmico de ΔP .
Xing et al. (2014)	3,22 x 43 x 2000	5,99 / 13,35	Ascendente	Água/Ar	PMMA	0,16 – 3,8	0,5 - 32	-
	1,41 x 43 x 2000	2,73 / 30,5						

Lowry e Kawaji (1988) apud Wilmarth e Ishii (1994) foram pioneiros em apresentar seu estudo envolvendo canais retangulares com dimensões características reduzidas. Eles apresentaram um estudo envolvendo canais verticais com escoamento ascendente, para $0,99 \leq D_H \leq 1,95$ mm e com elevada razão entre as dimensões de seus dois lados. Eles distinguiram os padrões bolhas, intermitente (bolhas alongadas e agitante) e anular. Segundo reportado por Ali et al. (1993) no mapa de escoamento apresentado por Lowry e Kawaji (1988) a transição bolha-intermitente possui tendências similares as observadas para canais convencionais. Entretanto a transição intermitente-anular apresenta diferenças significativas, ocorrendo para j_G inferiores.

Ali et al. (1993) propuseram um mapa de escoamento desenvolvido a partir de dados para canais retangulares de diâmetro hidráulico de 1,54 e 2,88 mm, posicionados segundo as seguintes inclinações: vertical ascendente, vertical descendente, canal inclinado em 45° com escoamento ascendente e descendente e horizontal com o lado maior do canal orientado horizontalmente. O mapa envolvendo estas inclinações é ilustrado na Fig. 3.1:

Figura 3.1 Mapa de escoamento para canal retangular em múltiplas inclinações, Ali et al. (1993).

onde S indica o espaçamento entre placas. Segundo os autores, a transição bolha-intermitente e intermitente-anular não são alteradas significativamente pela inclinação do canal quando o lado maior do canal posiciona-se horizontalmente (indicado como H no mapa). Escoamentos descendentes (D) apresentam tendências similares das observadas em canais horizontais e

ascendentes. Alterações significativas são evidenciadas com variações do espaçamento entre as placas, constatando-se que com diminuição deste espaçamento o valor de j_L de transição é reduzido.

Na zona do mapa correspondente a j_L inferiores a 0,5 m/s, para canal horizontal e vertical descendente, os autores indicam que ocorre uma transição abrupta para o padrão denominado de “rivulet”, o qual apresenta características similares ao padrão estratificado ondulado.

A transição para “rivulet” é influenciada significativamente pela orientação do canal e pela separação entre as placas, de forma que para maiores espaçamentos este padrão é suprimido. Os autores também apresentam um mapa, ilustrado na Fig. 3.2, que foi desenvolvido para canal horizontal com o lado maior do canal posicionado verticalmente.

Figura 3.2 Mapa de escoamento para canal retangular horizontal com lado maior do canal posicionado verticalmente, Ali et al. (1993).

onde observa-se uma influência significativa do espaçamento entre placas nas transições e o escoamento anular não é identificado. Ali et al. (1993) sugerem que efeitos gravitacionais impossibilitam a formação do filme líquido ao longo do perímetro do canal.

A Fig. 3.3 apresenta uma comparação entre os mapas de Chen et al. (2009), Coleman e Garimella (1999) e Mandhane et al. (1974).

Figura 3.3 Comparação entre os mapas para padrões de escoamento de Chen et al. (2009), Mandhane et al. (1974) e Coleman e Garimella (1999).

O mapa de Mandhane et al. (1974) desenvolvido para tubulações com diâmetros superiores a 10 mm, e é indicado por Chen et al. (2009) como um mapa de escoamento convencional. Este autor também reporta que as transições proporcionadas por este mapa possuem elevada similaridade com as transições obtidas a partir de seus resultados experimentais, como se verifica na Fig. 3.3.

O mapa de Chen et al. (2009) foi desenvolvido para canais de diâmetros hidráulicos de 3, 4 e 4,5 mm. Este mapa indica que a transição intermitente-anular ocorre para valores de j_G inferiores as previstas para canais circulares. Comportamento similar foi verificado por Ali et al. (1993) para com fator de forma superior. Chen et al. (2009) relaciona tal comportamento com acumulação de líquido nos cantos superiores, desta forma favorecendo a formação de uma película de líquido ao longo do perímetro do canal.

Padrão estratificado também é previsto na região do mapa correspondendo a j_L inferior a 0,3 m/s. Neste caso a orientação vertical do lado maior do canal favorece a segregação das fases pelos efeitos de empuxo.

O mapa proposto por Chen et al. (2009) apresenta diferenças significativa das transições propostas por Coleman e Garimella (1999). Vale ressaltar que o mapa de Coleman e Garimella (1999) retangular foi desenvolvido para um canal de diâmetro hidráulico de 5,36 mm e o lado maior do canal foi posicionado horizontalmente.

Constatou-se a partir da Fig. 3.3 que a transição intermitente - disperso e intermitente - estratificado proposta por Coleman e Garimella (1999) ocorre para valores de transição de j_L inferiores as transições propostas por Chen et al. (2009). Também se verifica que a transição intermitente - anular propostas por Coleman e Garimella ocorre segundo valores de transição de j_G aproximadamente constante e inferiores aos observados no mapa proposto por Chen et al. (2009). Vale ressaltar que ambos os mapas, foram desenvolvidos a partir de identificação com câmera de alta velocidade.

A Fig. 3.4 ilustra o mapa de escoamento proposto por Mishima et al. (1993), para canal com elevada relação de aspecto.

Figura 3.4 Mapa de escoamento proporcionado por Mishima et al. (1993) para canal retangular 40 x 1,07 mm² e 40 x 2,4 mm².

Os autores distinguiram para o canal de seção maior os seguintes padrões: bolhas, intermitente, agitante e anular. No canal com espaçamento entre placas de 1,07 mm padrão agitante não foi identificado.

Mapas de escoamentos desenvolvidos em geometrias similares que Mishima et al. (1993), foram apresentadas por Xu (1999) e Satitchaicharoen e Wongwises (2004). Eles reportam que para canais com elevado fator de forma observa-se o deslocamento da transição entre padrões bolha alongada e agitante para a direita, correspondendo a valores de j_G superiores.

Na Fig. 3.5 apresenta-se uma comparação entre os mapas desenvolvidos por Wölk et al. (2000) Yang et al. (2010), e Li et al. (2014).

Figura 3.5 Comparação entre os mapas para padrões de escoamento de Wölk et al. (2000), Yang et al. (2010) e Li et al. (2014).

As transições comparadas na Fig. 3.5 foram desenvolvidas em escoamentos verticais para canais retangulares com suas dimensões laterais envolvendo fatores de forma entre 1 e 2. Constata-se, a partir da Fig. 3.5, que para os canais comparados, o padrão agitante é identificado, similar ao observado em canais com elevado fator de forma.

Nos mapas apresentados na Fig. 3.5 os autores distinguem padrões de escoamento segundo bolhas dispersas, intermitente, agitante e anular. Vale ressaltar que as transições propostas por Wölk et al. (2000) e Li et al. (2014) foram desenvolvidas em estudos envolvendo escoamentos água/ar, e Yang et al. (2010) para água/N₂.

Observa-se que a transição intermitente anular proporcionada Li et al. (2014) ocorre para valores inferiores de j_G em comparação com a transição indicada por Yang et al. (2010). Este comportamento pode ser explicado considerando as indicações de Chen et al. (2009), segundo as quais em canais retangulares o escoamento anular é favorecido, como resultado de

líquido acumulado nos cantos, sendo maior a probabilidade de formação de filme líquido com menor separação entre os cantos.

Canais retangulares inclinados foram raramente estudados e mapas de escoamentos foram propostos apenas por Ali et al. (1993) para canais com fator de forma elevado e inclinação de 45° . Estes autores indicam que, para estas dimensões, a influência da inclinação não é significativa.

Bhusan et al. (2009) estudou as características de bolhas alongadas escoando em líquido estagnado em canais retangulares de seções $2,7 \times 5,1 \text{ mm}^2$ e $2,7 \times 10 \text{ mm}^2$, variando suas inclinações em relação ao plano horizontal entre 0° e 90° . Adicionalmente, visando estudar o efeito da rotação axial do canal, o lado maior do canal foi posicionado vertical e horizontalmente. Os resultados experimentais indicaram que para os canais com lado maior posicionado verticalmente as tendências são similares as observadas em canais circulares, como ilustra a Fig. 3.6. A velocidade da bolha se eleva com o incremento da inclinação apresentado um valor máximo para um ângulo de 45° , a partir do qual incrementos adicionais na inclinação causam a redução da velocidade da bolha.

Figura 3.6 Velocidade da bolha alongada para diferentes inclinações do canal, Bhusan et al. (2009).

O autor relaciona este comportamento com efeitos combinados de gravidade e da forma da interface frontal da bolha. Na Fig. 3.7 se ilustram imagens da bolha alongada no canal retangular de $D_H = 3,53 \text{ mm}$ com a face maior posicionada vertical, para 5 inclinações em relação ao plano horizontal.

Figura 3.7 Efeito da inclinação na forma da bolha alongada para canal retangular de $D_H = 3,53$ mm com lado maior posicionado verticalmente, Bhusan et al. (2009).

Observa-se que para o canal posicionado horizontalmente a interface da bolha tem forma assimétrica, e conforme a inclinação varia para 30° esta interface torna-se mais proeminente. Para ângulo de 0° e 30° as fases tendem a segregar por efeito da gravidade e o líquido na região inferior possui uma espessura maior que na região superior. Já a partir de 45° a bolha torna-se simétrica em relação ao eixo do canal.

Para os canais com face maior posicionado horizontalmente, a velocidade da bolha segundo ilustra a Fig. 3.6 aumenta progressivamente conforme o ângulo de inclinação do canal varia entre 0° e 90° . A partir desta figura também é verificado que com o incremento da inclinação conforme o escoamento se aproxima da condição vertical o efeito da rotação do canal torne-se desprezível nas características da bolha. Desta forma, observa-se que a velocidade da bolha para escoamento vertical não é alterada pela rotação do canal em torno de seu eixo.

Os autores também indicaram que com canal com seu lado maior posicionando horizontalmente, a bolha é simétrica em relação ao eixo e apresenta espessura de filme uniforme para todas as inclinações entre 0° e 90° , como se ilustra na Fig. 3.8.

Figura 3.8 Efeito da inclinação na forma da bolha alongada para canal retangular de $D_H = 3,53$ mm com lado maior posicionado horizontalmente, Bhusan et al. (2009).

onde tal comportamento é relacionado, segundo os autores, a efeitos de tensão superficial. Bhusan et al. (2009) também realizaram experimentos com o líquido também escoando, visando avaliar a o efeito da inclinação na velocidade da bolha para estas condições. Os resultados destes últimos indicaram que o parâmetro de distribuição no “drift flux model” foi determinado, resultando próximo de 1. Exceto para o canal com seu lado maior posicionado verticalmente, condição na qual o parâmetro de distribuição variou entre 1,1 e 1,3. Na Fig. 3.9 apresenta resultados da velocidade da bolha para canal segundo um ângulo de inclinação de 60° em relação ao plano horizontal.

Figura 3.9 Velocidade da bolha em função da velocidade da mistura para canal inclinado 60° em relação ao plano horizontal, Bhusan et al. (2009).

Na Fig. 3.9 constata-se que em canais posicionados com seu lado maior vertical possuem bolhas com velocidade superior em relação a canais com seu lado maior horizontal. Em relação com a Fig. 3.9, se observa que o canal de diâmetro hidráulico 4,25 mm com seu lado maior posicionado vertical possui um parâmetro de distribuição elevado em relação aos demais canais. Isto permite concluir que este posicionamento distribui as fases de forma que a fração de vazio local encontra-se concentrada na linha central do duto.

Também em líquido estagnado, Hamaguchi (2003) estudou as características de uma bolha alongada em um canal retangular inclinado, e adicionalmente rotacionado em um ângulo θ em relação ao seu eixo longitudinal, sendo este ângulo denominado de “ângulo de postura”. A seção de teste foi feita com espaçamento entre placa constante, igual a 5 mm, variando sua outra dimensão segundo comprimentos de 40, 30, 20, 15, 10 e 5 mm, correspondendo a diâmetros hidráulicos entre 5 a 8,9 mm. O líquido utilizado nos ensaios foi óleo de silicone, cuja viscosidade cinemática foi variada durante o ensaio.

Os resultados indicaram que a velocidade da bolha varia para $\theta = 0^\circ$ de forma proporcional com $(\sin \phi)^n$, onde o ϕ é a inclinação do canal em relação ao plano horizontal e n é um expoente que varia entre 1 e 3 conforme a viscosidade do óleo. Resultados da velocidade das bolhas para ângulos distintos de $\theta = 0^\circ$ são ilustrados na Fig. 3.10.

Figura 3.10 Efeito da inclinação do canal e de θ na velocidade da bolha, Hamaguchi (2003).

Nesta figura, observa-se que a relação entre θ e a velocidade da bolha torna-se complexa para $\theta \neq 0^\circ$. Para θ entre 0° e 30° a velocidade da bolha aumenta progressivamente com a inclinação do canal. Já para θ entre 30° e 90° a velocidade da bolha aumenta

progressivamente com incremento da inclinação do canal até atingir um máximo para uma inclinação de 45° , a partir da qual diminui progressivamente com incrementos adicionais de ϕ .

Vale ressaltar que estudos envolvendo o efeito do ângulo θ em canais retangulares de dimensões reduzidas raramente tem sido reportado na literatura. Encontra-se dentro de estes, trabalho de Shedd (2001) para canal retangular de dimensões convencionais $15,8 \times 15,8 \text{ mm}^2$, no qual mediu a espessura do filme líquido para o canal posicionado segundo $\theta=45^\circ$.

Observa-se também da Fig. 3.10 que a velocidade da bolha para canal vertical coincide independentemente de θ . Este resultado concorda com os dados de Bhusan et al. (2009) para canal vertical ascendente, condição para a qual o efeito da rotação do canal torne-se desprezível nas características do escoamento.

3.3.2. MÉTODOS DE PREVISÃO DE PADRÕES DE ESCOAMENTO

Neste item são apresentados os métodos de previsão de padrões de escoamento desenvolvidos para canais reduzidos.

Barnea et al. (1983)

Este método foi elaborado a partir da modificação do método previamente proposto por Taitel e Dukler (1976) para escoamento horizontal. Este método assume que a transição entre os padrões estratificado e intermitente ocorre devido a combinação de efeitos gravitacionais e de tensão superficial. Segundo a Fig. 3.11 o líquido ascende devido a efeito de tensão superficial.

Figura 3.11 Representação esquemática do ascendo de líquido por efeito de tensão superficial.

Com base numa análise simplificada, considera-se a curvatura do pistão como uma circunferência de raio y , e igualando os volumes v_1 e v_2 , é obtida a seguinte relação:

$$y = \frac{4}{\pi} h_G \quad (3.6)$$

A partir de um balanço entre as forças gravitacionais e de tensão superficial na região ABC, tem-se a seguinte condição para transição entre padrões de escoamento:

$$h_G \leq \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\sigma}{g \rho_L \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)}} \quad (3.7)$$

Para o tubos o valor máximo que pode ser alcançado é $y=D$, resultando a seguinte relação:

$$\frac{h_G}{D} \leq \frac{\pi}{4} \quad (3.8)$$

onde h_G é a distância medida a partir da região superior da tubulação até a interface em escoamento estratificado em equilíbrio.

Os autores também modificaram a critérios para determinar a transição intermitente anular, considerando que esta ocorre para um nível de líquido $h_G/D=0,35$, distinto do proposto por Taitel e Dukler (1976) a 0,5.

Hibiki e Mishima (2001)

Kaichiro e Ishii (1984) elaboraram um método de previsão de padrões para tubulações verticais. Hibiki e Mishima (2001) adaptaram este método para canais retangulares estreitos (formado por placas planas) posicionados verticalmente. O método classifica os seguintes padrões: bolhas, bolhas alongada, agitante e anular.

Segundo Hibiki e Mishima (2001) em escoamento ascendente a transição do padrão bolhas para intermitente com bolhas alongadas ocorre para uma fração de vazio entre 0,2 e 0,3. Já a transição de bolhas alongadas para agitante ocorre para a fração volumétrica na região compreendida pela bolha alongada e o pistão de líquido superior àquela apenas na região entre bolhas alongadas caracterizadas por uma ponte de líquido contendo bolhas dispersas. A Fig. 3.12 ilustra a bolha alongada em escoamento ascendente circundada por um filme de líquido escoando no sentido descendente conforme indicado por Kaichiro e Ishii (1984).

Figura 3.12 Bolha alongada. Kaichiro e Ishii (1984).

Segundo Hibiki e Mishima (2001), a transição intermitente para anular ocorre quando o filme líquido que contorna as bolhas alongadas passa a fluir no sentido ascendente. Um segundo mecanismo postulado por eles como responsável pela transição para anular é a destruição das pontes de líquido por arrasto das bolhas e deformação destas.

Felcar et al. (2007)

Estes autores modificaram o método original de Taitel e Dukler (1976) com base na incorporação de adimensionais que foram correlacionados através de uma base de dados ampla levantada na literatura. Eles alteraram a expressão de transição estratificado-anular incorporando um parâmetro Z incluído segundo a seguinte equação:

$$Fr^2 \left[\frac{1}{(1 - \tilde{h}_L)^2} - \frac{\tilde{u}_G^2 \frac{d\tilde{A}_L}{d\tilde{h}_L}}{\tilde{A}_G} \right] + Z = 1 \quad (3.9)$$

onde

$$Fr = \sqrt{\frac{\rho_G j_G^2}{(\rho_L - \rho_G) g D_H}} \quad (3.10)$$

O parâmetro Z é dado como função do número de Eötvös modificado, definido segundo a Eq. (3.2), e o número de Weber, dado como se segue:

$$Z = -56E\ddot{o}^{-0,6} \left(1 - e^{E\ddot{o}^{0,5}We}\right) \quad (3.11)$$

$$We = \frac{\rho_G (u_G - u_L)^2 D_H}{\sigma} \quad (3.12)$$

Felcar et al. (2007) também alteraram a equação de previsão da transição intermitente-anular inicialmente proposta por Taitel e Dukler (1976) como ocorrendo para uma fração de vazio superficial constante. Segundo Felcar et al. (2007) a fração de vazio superficial para transição entre estes padrões é dada por:

$$\alpha = 1,2E\ddot{o}^{-0,088}We^{-0,16} \quad (3.13)$$

Para valores do número de Eötvos modificado superiores a 0,41, o método não prevê padrão estratificado, o qual é suprimido pela elevação de líquido junto à parede devido à forças capilares predominantes em relação a efeitos gravitacionais.

Ong e Thome (2009)

Os autores propuseram um método de previsão com base em seus resultados experimentais para tubo de diâmetro igual a 1,03 mm para R134a, R236fa e R245fa, e resultados anteriores obtidos por Revellin e Thome (2007) em tubos de diâmetros de 0,5 e 0,8 mm com os fluidos R134a e R236fa. Ong e Thome (2009) distinguiram 4 padrões: bolha isolada BI, bolhas coalescentes BC, padrão anular e pós-secagem de parede. A classificação dos padrões se deu com base em imagens do escoamento e o método ótico desenvolvido por Revellin e Thome (2007), baseado na variação intensidade de um laser ao atravessar o escoamento bifásico. Segundo Ong e Thome (2009), os títulos de transição entre padrões bolha isolada e bolhas coalescentes é dado por:

$$x_{BI/BC} = 0,763 \left(\text{Re}_{L0} \frac{Bo}{We_{G0}} \right)^{0,41} \quad (3.14)$$

onde Bo é o Número de ebulição e o Número de Weber para fase gás, são definidos como:

$$Bo = \frac{q}{Gi_{GL}} \quad (3.15)$$

$$We_{G0} = \frac{G^2 D}{\sigma \rho_G} \quad (3.16)$$

A transição entre bolhas coalescentes e padrão anular é dada por:

$$x_{BC/ANULAR} = 0,00014 \text{Re}_{L0}^{1,47} \text{We}_{L0}^{-1,23} \left[\frac{p_{SAT}(\text{Fluido})}{p_{SAT}(\text{R134a})} \right]^{0,45} \quad (3.17)$$

onde o Número de weber para fase líquido é definido analogamente ao Número de Weber da fase gás. Neste caso, é incorporado um parâmetro dado pela razão entre a pressão de saturação do fluido de trabalho com a pressão de saturação do R134a na mesma temperatura.

Comparação entre métodos

A Fig. 3.13 ilustra uma comparação entre os métodos de previsão desenvolvidos para escoamentos horizontais.

Figura 3.13 Comparação entre métodos de previsão desenvolvidos para canais reduzidos horizontais, água/ar e $D_H=6,24$ mm.

Observa-se que as transições proporcionadas pelo método de Ong e Thome (2009) considerando fluxos de calor desprezíveis apresentam diferenças significativas em relação aos métodos de Barnea et al. (1983) e Felcar et al. (2007). O método de Felcar et al. (2007) proporciona uma transição intermitente-anular ocorrendo para valores de j_G superiores aos indicados por Barnea et al. (1983).

Na Fig. 3.14 ilustram-se as transições entre padrões segundo o método de Hibiki e Mishima (2001). Em comparação com canal horizontal, este método prevê o padrão bolhas dispersas para uma ampla faixa de valores de j_L , distinto ao previsto em escoamento horizontal

pelo método de Barnea et al. (1983) que prevê escoamento em bolhas dispersas a partir de valores de j_L superiores a 1 m/s.

Figura 3.14 Método de previsão para canal vertical. Hibiki e Mishima (2001), água/ar e $D_H = 6,24$ mm.

Observa-se também que em canal vertical a transição intermitente – anular é prevista ocorrendo a j_G constante. Já para escoamento horizontal, a transição intermitente – anular proposta pelo método de Barnea et al. (1983) ocorre com tendência diferente, sendo esta transição segundo valores de j_G que aumentam com acréscimos progressivos de j_L .

3.4. PERDA DE PRESSÃO

Os primeiros estudos para geometrias retangulares focaram em canais formados por placas planas paralelas caracterizadas por razões elevadas entre as dimensões das faces dos canais. Para estes canais, o valor do parâmetro C na Eq. (2.53) tende à zero, como é reportado por Moriyama et al. (1992) e Ali et al. (1993). Lowry e Kawaji (1988) apud Wambsganss et al. (1992) indicam que os resultados de medições de perda de pressão em canais com espaçamento de 0,5, 1 e 2 mm têm tendências semelhantes as proporcionadas pelo método de previsão de Lockhart e Martinelli (1949), apesar deste método não capturar adequadamente efeitos relacionados a velocidade mássica.

Assim, métodos de previsão de perda de pressão para canais retangulares com dimensões reduzidas foram desenvolvidos. Na Tab. 3.3 apresentam-se 10 métodos levantados

na literatura. Eles foram desenvolvidos com base em experimentos envolvendo escoamentos água/ar, ou a partir de bases de dados incluindo água/ar.

Tabela 3.3 Métodos de previsão de perda de pressão por atrito em canais de retangulares de dimensões reduzidas.

Autor	Correlação	Condições Experimentais
Wambsganss et al. (1992)	$C = \begin{cases} aX^b & \text{Re}_{L0} < 2.200 \\ 21 & \text{Re}_{L0} \geq 2.200 \end{cases}$ $a = -2,44 + 0,00939 \text{Re}_{L0}$ $b = -0,938 + 0,00939 \text{Re}_{L0}$	$D_H = 2,88$ $\omega = 6$ Água/ar Horizontal
Mishima et al. (1993)	$C = 21 \cdot (1 - e^{-270 D_H})$	$D_H = 2 / 4,6 / 8,9$ $\omega = 37,4 / 16,7 / 10$ Água/ar Ascendente
Mishima e Hibiki (1996)	$C = 21(1 - e^{-319 D_H})$	$D_H = 2 / 4,6 / 8,9$ $\omega = 37,4 / 16,7 / 10$ Água/ar Ascendente
Lee e Lee (2001)	$C = A \lambda^0 Ca^R \text{Re}_{L0}^S$ $\lambda = \frac{\mu_L^2}{\rho_L \sigma D_H} \quad Ca = \frac{\mu_L j_L}{\sigma}$	$D_H = 0,78 / 1,9 / 3,6 / 6,7$ $\omega = 50 / 20 / 10 / 5$ Água/ar Horizontal
Yue et al. (2004)	$C = \frac{0,411822 \text{Re}_L^{0,600428}}{\chi^{0,0305}}$	$D_H = 0,333 / 0,528$ $\omega = 1 / 1,17$ Horizontal Água/N ₂
English e Kandlikar (2006)	$C = 5(1 - e^{-319 D_H})$	$D_H = 1$ $\omega = 1$ Horizontal Água (+surfactantes) /ar
Ide et al. (2007)	$\phi_L = 0,2485 \cdot \omega^{-0,145} \left(\frac{j_L}{\sqrt{g D_H}} \right)^{-0,233} \text{Re}_L^{\frac{3}{8}}$ $, \text{Re}_{jL} \leq 2400$ $\phi_L = 0,0848 \cdot \omega^{-0,145} \left(\frac{1}{1 - \beta} \right)^{0,425} \text{Re}_L^{\frac{3}{8}}$ $, \text{Re}_{jL} > 2400$	$D_H = 1 / 1,33 / 1,66 / 1,98$ $\omega = 1 / 2 / 5 / 9$ Vertical e Horizontal Água/ar
Zhang et al. (2007)	$C = 21 \left(1 - e^{\frac{-0,358}{Co}} \right)$	2.201 dados (água/ar, R113/N ₂ , etanol/Ar, óleo/ar, amônia, R134a, R22, R404a, R236ea, R410a, R12, R113, água/vapor). Geometria circular, retangular, triangular e multicanal. Recomendada para $0,014 < D_H < 6,25$ mm, $\text{Re}_L < 2000$ $\text{Re}_G < 2000$.
Chen et al. (2007)	$C = a \chi^b$ $a = 5,55 - 0,7555 \omega^{0,805} + 0,00439 \text{Re}_{L0}$ $b = 1,001 + 0,0005 \omega^{-0,895}$	$D_H = 3 / 4 / 4,5$ mm $\omega = 1 / 2 / 3$ Horizontal Água /Ar
Zhang et al. (2010)	$C = 21 \left(1 - e^{\frac{-0,674}{Co}} \right)$	Parcela do banco de dados de Zhang et al. (2007). Recomendada para $0,014 < D_H < 6,25$ mm, $\text{Re}_L < 2000$ $\text{Re}_G < 2000$.

Estes métodos têm seus desenvolvimentos baseados em métodos de previsão da perda de pressão em canais convencionais. Os métodos correspondem a correlações do parâmetro C ou do multiplicador bifásico na Eq. (2.53) do método de Lockhart e Martinelli (1949), e apenas um dos métodos é baseado em ajuste de multiplicador bifásico também na Eq. (2.53).

A Tab. 3.3 inclui uma coluna com informação sobre as condições experimentais nas quais o método desenvolvido se baseou, nela ω é o fator de forma do canal, definido como a razão entre as dimensões do lado maior e menor do canal.

Uns dos primeiros métodos para canais retangulares foi proposto por Wambsganss et al. (1992). Estes autores propuseram um método para o parâmetro C é dado com função do Re_{Lo} , de forma a capturar a influência da velocidade mássica no parâmetro C . Neste método, para valores de Re_{Lo} superiores a 2200 o parâmetro C torna-se constante, igual a 21, desta forma próximo ao valor do método de Lockhart e Martinelli (1949) desenvolvido para tubulações em canais convencionais.

Mishima et al. (1993), Mishima e Hibiki (1996) e English e Kandlikar (2006) ajustaram o parâmetro C apenas como função do diâmetro hidráulico do canal, sem considerar os efeitos da velocidade mássica ou propriedades dos fluidos. Segundo estes métodos em canais com diâmetros reduzidos o valor do parâmetro C tende a zero, similar tendência foi indicada por Moriyama et al. (1992) e Ali et al. (1993). Assim, por exemplo, o método de Mishima et al. (1993) prevê um valor de $C = 0,1$ para um canal diâmetro hidráulico de 0,018 mm.

No ajuste do parâmetro C segundo os métodos de Zhang et al. (2007) e Zhang et al. (2010) o efeito do fluido foi incluído através do número de confinamento. Com base no mesmo banco de dados estes autores ajustaram as constantes nos seus respectivos métodos.

Zhang et al. (2007) considerou os 2201 resultados experimentais para determinar a constante 0,358 indicada na Tab.3.3. Neste caso, tais resultados experimentais consideram perda de pressão em escoamento em condições adiabáticas e diabáticas. Zhang et al. (2010) separou a base de dados, considerando apenas escoamentos gás-líquido em condições adiabáticas, a partir dos quais recomendou utilizar a constante 0,674 para seu modelo.

Lee e Lee (2001) propuseram um método de previsão onde o parâmetro C é dado como função dos seguintes números adimensionais: Número de Reynolds da mistura escoando como líquido, Capilaridade e o Suratman. Estes adimensionais foram incluídos com base nas considerações de Suo e Griffith (1963) visando considerar os fatores que influenciam a velocidade da bolha em escoamento horizontal.

O Número de Reynolds considera os efeitos inerciais e viscosos. O Número de Capilaridade representa a importância relativa dos efeitos viscosos em relação aos efeitos de tensão superficial. O terceiro adimensional no método de Lee e Lee (2001), λ na Tab. 3.4, corresponde ao inverso do número de Suratman:

$$Su = \frac{\rho_L \sigma D_H}{\mu_L^2} \quad (3.18)$$

Lee e Lee (2001) incluíram o adimensional λ visando capturar a importância relativa dos efeitos gravitacionais em relação aos efeitos de tensão superficial. O Número de Suratman também é equivalente a raiz quadrada da razão entre o Reynolds e o Weber. Alternativamente, Awad (2012) indica que este adimensional também é interpretado como o número de Reynolds com velocidade característica igual a velocidade capilar (σ/μ), sendo uma medida adequada do grau de amortecimento em escoamento bifásico. Os coeficientes A, Q, P e R no método de Lee e Lee (2001) assumem os valores dados na Tab. 3.4:

Tabela 3.4 Coeficientes da correlação de Lee e Lee (2001).

*Regime do escoamento		A	Q	R	S
Líquido	Gás				
Laminar	Laminar	$6,833 \times 10^{-8}$	-1,317	0,719	0,577
Laminar	Turbulento	$6,185 \times 10^{-2}$	0	0	0,726
Turbulento	Laminar	3,627	0	0	0,174
Turbulento	Turbulento	0,408	0	0	0,451

onde o autor define os regimes de escoamento segundo: laminar: $Re_{jL}, Re_{jL} < 2.000$, turbulento: $Re_{jL}, Re_{jL} > 2.000$.

Apenas os métodos de Ide et al. (2007) e Chen et al. (2007) consideram a influência do fator de forma ω na perda de pressão. A Fig. 3.15 ilustra uma comparação entre a perda de pressão calculada segundo os métodos de Ide et al. (2007) e Chen et al. (2007). Constata-se nesta figura que o fator de forma segundo estes modelos proporciona tendências diferentes dos gradientes de pressão para ω inferior a 5. Para o aumento progressivo de ω , Ide et al. (2007) indica redução da perda de pressão, enquanto Chen et al. (2007) prevê seu aumento. Já, para valores de ω superiores a 5, segundo estes modelos a perda de pressão não varia significativamente com o fator de forma.

Figura 3.15 Influência do fator de forma na perda de pressão em canais retangulares segundo os métodos de Ide et al. (2007) e Chen et al. (2007) $D_H=6,24$ mm e $j_L=0,3$ m/s.

A Fig. 3.16 ilustra uma comparação entre os métodos de previsão apresentados na Tab. 3.4. Observa-se que os métodos de Wambsganss et al. (1992), Mishima et al. (1993), Mishima e Hibiki (1996), English e Kandlikar (2006), Zhang et al. (2007), Chen et al. (2007) e Zhang et al. (2010) apresentam uma mudança abrupta para j_G próximo de 5 m/s. Nesta região ocorre a transição de regime laminar para turbulento da fase gasosa, correspondendo a um Re_{j_G} de 2300.

Figura 3.16 Comparação de métodos de previsão de perda de pressão da literatura propostos para canais retangulares, $D_H=6,24$ mm, $\omega = 1,08$ e $G=300$ kg/m²s.

O método de Lee e Lee (2001) apresenta uma variação no seu comportamento para j_G próximo de 4,6 m/s, sendo a transição laminar-turbulenta da fase gás ocorrendo segundo Reynolds 2000, como é indicado na Tab. 3.3 que descreve as equações do método de Lee e Lee (2001).

O método de Ide et al. (2007) não apresenta variação abrupta para j_G próximo de 5 m/s, diferente do observado nos demais métodos. Para tais valores de j_G , este método não apresenta variações abruptas no multiplicador bifásico pois ele é dado com função direta de j_G e j_L . No entanto, observa-se uma variação para valores de j_G próximos a 0,5 m/s, que é onde ocorre a transição de Re_{jG} , sendo este Reynolds determinado a partir da velocidade característica igual a velocidade superficial da mistura J .

CAPÍTULO 4

APARATO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve o aparato experimental, projetado e construído durante o presente estudo, o qual se encontra no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). A bancada constitui-se de um circuito de teste contendo uma seção transparente para visualização do escoamento e avaliação da perda de pressão, e um circuito auxiliar para controle e estabelecimento da temperatura da água do circuito de testes. Água escoar em circuito fechado, com injeção de ar à montante da seção de teste e separação dos fluidos a jusante, com ar sendo rejeitado para o ambiente.

O aparato foi construído de forma a possibilitar variar a inclinação do escoamento segundo ângulos de -90° a 90° e rotacionar a seção de teste em relação ao seu eixo longitudinal segundo ângulos de -90° e 90° . A Fig. 3.1 apresenta um registro fotográfico da estrutura de suporte da seção de testes inclinada segundo um ângulo de 30° , determinado a partir do plano horizontal, e com rotação axial nula. A seguir os componentes do aparato experimental são detalhados.

Figura 4.1 Registro fotográfico da Bancada Experimental.

4.1. CIRCUITO PRINCIPAL

No circuito principal, ilustrado esquematicamente na Fig. 3.2 água destilada, inicialmente no reservatório–separador, é deslocada por uma bomba de engrenagens (constituídas de PTFE) com acoplamento magnético e deslocamento nominal de 0,64 ml/ver, modelo GJ N23 PF1SA, fabricada pela MICROPUMP. O acionamento da bomba se dá através de um motor trifásico da WEG de 2 polos com potência nominal de 3kW/220V e rotação de 3370 RPM. A velocidade deste motor é determinada através de um variador de frequência da Danfoss, Modelo VLT-176F7301 de 0,75 kW/220V. Operou-se com frequências de alimentação do motor superiores a 8 Hz de forma assegurar o resfriamento do motor. A vazão de água é controlada a partir do sistema de aquisição de dados através da comunicação analógica entre o variador e a placa NI USB 6009, com base em um sinal de tensão variando entre 0 a 5 V.

À jusante da bomba encontra-se um rotâmetro com faixa de medição de 96 a 1.881 ml/min. Entre a seção de desenvolvimento do escoamento e o rotâmetro encontra-se um misturador estático no qual ar é injetado e a mistura bifásica estabelecida. O ar é proveniente do sistema de ar comprimido disponível no laboratório e circula inicialmente por um filtro de óleo e regulador de pressão. Este filtro tem a finalidade de eliminar partículas sólidas e possíveis gotículas de óleo de lubrificação provenientes do compressor.

Logo após o filtro de óleo, dois rotômetros para gás encontram-se instalados em paralelo. Durante os ensaios apenas um dos rotômetros é utilizado, cuja especificação se dá de acordo com a faixa de vazão do experimento. A operação de um dos rotômetros se dá através de manobra das válvulas de agulha na entrada destes componentes. Este arranjo permite realizar ensaios para vazões entre 0,04 - 10 lpm.

A temperatura do fluxo de água é determinada logo a montante do misturador através do termopar T_1 . Já para o ar, determina-se seu estado termodinâmico logo a jusante dos rotômetros com base no termopar T_2 e do transdutor de pressão absoluta p_1 .

A seção de desenvolvimento do escoamento bifásico, localizada a montante da seção de testes consiste em um tubo flexível com comprimento de 2 m e área da seção transversal de 12,56 mm² (diâmetro interno 4 mm).

Figura 4.2 Diagrama esquemático do circuito principal.

Próxima à entrada da seção de testes, a temperatura e a pressão absoluta da mistura bifásica são determinadas através dos termopares T_3 e do transdutor de pressão absoluta P_2 . Um transdutor diferencial de pressão é utilizado para avaliação da perda de pressão ao longo da seção de teste.

Os sinais dos transdutores são monitorados, adquiridos e gravados através de um sistema de aquisição de dados da National Instruments e um computador pessoal.

Pares de emissores laser e sensores fotodiodos foram instalados próximos às linhas de tomada de pressão do transdutor diferencial, sendo os sinais destes dispositivos monitorados e gravados pelo sistema de aquisição. Imagens do escoamento são obtidas a partir de uma distância de 750 mm da entrada da seção de testes transparente ($\approx 120D_H$) com uma câmera de captura de imagens de alta velocidade, alternativamente, utilizou-se uma câmera fotográfica.

Logo após a saída da seção de testes, a temperatura do fluxo bifásico é novamente determinada através do termopar T_4 . A partir daí, a mistura água/ar escoar até o reservatório–separador, no qual o ar é separado da água, sendo o primeiro eliminado para o ambiente e a água é depositada no fundo do reservatório onde é resfriada. O reservatório–separador consiste em uma seção em forma de cilindro, possuindo uma camisa, no interior da qual circula água resfriada por um circuito secundário.

No fundo do reservatório–separador encontra-se instalado um filtro metálico visando eliminar partículas do escoamento. Um tecido comercial de fibra de celulose encontra-se instalado junto ao filtro metálico para reter partículas menores evitando que estas circulem e se depositem ao longo do circuito principal.

Após o filtro, a água é conduzida através de um conduto de seção circular de aço inoxidável AISI 304 ($D_{EXT}=25,5$ mm e $D_{INT}= 22,8$ mm) conectado a linha de sucção da bomba de engrenagens. As uniões dos extremos deste duto são realizadas através de abraçadeira de parafuso único.

As tubulações usadas no circuito principal (linhas de ar comprimido, linha de água e para mistura bifásica) são de PVC reforçado para 17 bar (250 psi) de diâmetro 6,35 mm. A linha de desenvolvimento do escoamento consiste em uma tubulação flexível de polietileno de 4 mm de diâmetro interno.

4.2. ESTRUTURA

A seção de teste encontra-se sob uma estrutura de alumínio conforme ilustrado Fig. 4.3. Esta estrutura compõe-se de perfis estruturais modelo 40x80 M12 6R fabricados pela empresa FAMAK. A seção de testes de acrílico é fixada à estrutura de alumínio através de parafusos passantes de 6 mm e cantoneiras de alumínio produzidos por FAMAK.

Figura 4.3 Estrutura suporte da seção de teste.

A estrutura de alumínio encontra-se sob uma bancada suporte constituída de perfis de aço em L com dimensões de 50x3 mm. A fixação da estrutura de alumínio à bancada se dá através de dobradiças, conforme ilustra a Fig. 4.4, as quais junto a suportes angulares permitem

inclinar a estrutura em alumínio e consequentemente a seção de testes segundo ângulos de 0° a 90° em relação ao plano horizontal.

Figura 4.4 Ilustração esquemática da estrutura de suporte da seção de testes.

O mecanismo que permite a inclinação da seção de teste é constituído de dois pares de suportes angulares (um par de cada lado da seção de teste) fixados nas barras de alumínio através de parafusos conforme a Fig. 4.5. Estes suportes também são fabricados pela FAMAK.

Figura 4.5 Ilustração da fixação dos pares de suportes angulares.

Ilustra-se na Fig. 4.6 a bancada com a seção de testes posicionada em inclinações distintas.

Figura 4.6 Sistema de inclinação da seção de teste para duas posições.

O intercambiamento das tubulações de alimentação e drenagem com as seções inicialmente de entrada e saída permitem a obtenção tanto de escoamento ascendente como descendente.

A rotação da seção de teste em relação a seu eixo longitudinal, definida como θ , se dá através de um suporte angular ajustável que permite girar a seção de testes em até 180° e que é fixado apenas através de um parafuso, conforme ilustra na Fig. 4.7.

Figura 4.7 Esquema da rotação da seção de teste baseado em suporte angular ajustável.

4.3. SEÇÃO DE TESTE

Construiu-se a seção de testes a partir de placas de acrílico extrudadas. Este material é adequado para o presente estudo uma vez que apresenta reduzida condutividade térmica permitindo assim assumir o escoamento como adiabático. Além disso, o acrílico é transparente permitindo visualizar e obter imagens do escoamento. Este material ainda apresenta coeficiente de expansão desprezível para a faixa de temperaturas envolvidas no presente estudo. Algumas propriedades do acrílico encontram-se descritas na Tab. 4.1.

Tabela 4.1 Propriedades do de acrílico.

Propriedade	Valor
Condutividade Térmica [W/mK]	0,19
Coeficiente expansão térmica [m/m°C]	$7,2 \times 10^{-6}$
Índice de refração	1,49
Transmitância de luz [%]	92
Max. Temperatura Trabalho [°C]	71

A seção de teste foi projetada com comprimento de 960 mm e seção transversal de 6,0 x 6,5 mm² correspondendo a um diâmetro hidráulico de 6,24 mm. O processo usinagem das placas de acrílico que compõem a seção de teste, ilustradas na Fig. 4.8, ocorreu através de corte a laser. Adotou-se tal técnica pela precisão de corte e pela qualidade do acabamento superficial resultante nas superfícies laterais das placas.

Figura 4.8 Placas de acrílico usinadas com laser.

No presente estudo levantou-se através de método ótico o relevo de uma determinada região da superfície de testes, ilustrado na Fig. 4.9. Este equipamento modelo WYKO NT1100 fabricado pela empresa Veeco, encontra-se localizado no Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC - USP. Obteve-se para as regiões superiores e inferiores da placa uma rugosidade média $R_a = 0,007 \pm 0,00005 \mu m$ (calculado a partir da média aritmética dos valores absolutos de afastamento em relação a uma linha média, para a região da superfície considerada). Já para as faces laterais, a rugosidade média após processo de corte foi igual a $0,01 \pm 0,00005 \mu m$. Estes valores consistem em médias aritméticas dos valores avaliados para regiões distintas de uma única placa. Assim, para os cálculos apresentados nos Capítulos 5 e 6 adotou-se uma rugosidade ponderada, segundo as regiões do perímetro no canal correspondentes as laterais e as faces superior e inferior, sendo o valor da rugosidade ponderada igual a $0,0084 \mu m$.

Figura 4.9 Relevo superficial seção de teste avaliada com incremento de 40x.

A seção de teste resultante das placas encontra-se ilustrada na Fig. 4.10. As placas são fixadas por parafusos M3 e nas regiões terminais por 4 parafusos M6. Manta de polietileno foi utilizada como elemento de vedação conforme ilustrado Fig. 4.11. A montagem realizada permite visualização do escoamento na direção perpendicular ao plano da seção de teste, não proporcionando visualização lateral.

Figura 4.10 Ilustração da seção de teste.

Figura 4.11 Detalhe da conformação da seção de teste.

Assim, a seção de testes constituiu-se de um canal confinado em suas faces superior e inferior por placas de 4 mm de espessura, e as paredes laterais correspondem ao canal usinado

na placa de 6 mm realizada por corte laser. O comprimento total do canal é 960 mm ($153,85D_H$), com uma seção transversal do canal de 6,5 mm de largura e 6,0 mm de altura.

A entrada de fluido se dá perpendicularmente ao canal de teste, através de furos passantes de 6 mm de diâmetro. Este orifício está localizado nas placas inferiores na Fig. 4.12, e que correspondem a placas de espessura 10 mm e 4 mm, respectivamente. A extremidade final da seção de teste correspondendo à saída de fluido possui dimensões similares.

Figura 4.12 Detalhe da seção transversal da entrada/saída de fluido.

Os orifícios para conectar a os terminais para medição de pressão e temperatura são de 2 mm de diâmetro nas placas de acrílico inferiores, conforme se ilustra na Fig. 4.13. Adicionalmente, na placa de 10 mm de espessura se usinam dois orifícios de maior diâmetro para instalar um elemento de vedação.

Figura 4.13 Detalhe da seção transversal na tomada de pressão.

Na seção de teste encontram-se instalados quatro conectores de latão conforme ilustra a Fig. 4.14, sendo dois para a entrada e saída de fluido de teste, e outros dois estão conectados as tomadas do transdutor diferencial de pressão e ao transdutor de pressão absoluto. Um microtermopar T_3 , com junta quente de diâmetro aproximado 0,250 mm, encontra-se em contato com o fluido de teste através do conector localizado a jusante da conexão de entrada.

Figura 4.14 Diagrama esquemático da seção de testes.

Os dois conectores intermediários são de união com rosca, conforme ilustra a Fig. 4.14 e Fig. 4.15, e os dois conectores da entrada e saída são com união tipo espigão para tubulação flexível. Os conectores estão fixados na seção de teste por parafusos passantes M3 conforme Fig. 4.16. A fabricação dos conectores se deu por usinagem a partir de tarugos de latão. Posteriormente soldou-se a união comercial respectiva.

A união de rosca é de diâmetro externo 10,29 mm (1/8 NPT) visando ser interligados aos terminais do transdutor diferencial de pressão conforme ilustra a Fig. 4.14.

Com o objetivo de vedar o sistema e permitir à passagem do termopar T_3 , a região entre o conector e a placa de acrílico é preenchida com o elemento ilustrado na Fig. 4.17, fabricado em polímero contendo dois anéis de Viton na sua região superior e um outro anel de Viton na região inferior.

Figura 4.15 Ilustração da seção em corte do conector intermediários com rosca.

Figura 4.16 Detalhe das conexões da seção de teste.

Figura 4.17 Dispositivo de vedação dos conectores intermediários.

Assim, o termopar T_3 é instalado através da região entre o conector de latão e a placa de acrílico, passando através do furo com diâmetro de 2 mm, sendo pressionado contra a parede da placa de acrílico pelo dispositivo de vedação ilustrado na Fig. 4.17. Tubos capilares em cobre com diâmetro interno de 0,72 mm com conexões do tipo rosca de diâmetro externo 10,29 mm

(1/8 NPT) com tubo expandido são utilizados para interligar os conectores intermediários com os transdutores absoluto e diferencial de pressão.

Na entrada e saída da seção de teste são utilizados conectores similares, entretanto ao invés de ser soldada união do tipo rosca, utilizou-se um conector tipo espigão para tubulação flexível comerciais de 6,35 mm ($\frac{1}{4}$ ”). Também não foi utilizado um adaptador similar ao da Fig. 4.15, pois a entrada de fluido é direta sem necessidade de vedação.

Uma análise cuidadosa foi realizada com o objetivo de determinar a distância entre os conectores de entrada e saída na seção de teste e as tomadas de medida de pressão. Buscou-se através desta análise obter resultados para escoamento desenvolvido e sem efeitos relevantes de escoamentos secundários na saída.

Escoamentos monofásicos internos a tubos são considerados desenvolvidos para um comprimento do escoamento a partir do qual o perfil de velocidades se mantém. Em escoamento bifásico, a definição de escoamento desenvolvido torna-se complexa devido à alteração contínua da topologia das fases ao longo do escoamento. Desta forma, distintos critérios são propostos na literatura, geralmente baseados no estabelecimento de uma determinada característica do escoamento. Neste estudo, embora não avaliado, o escoamento bifásico foi considerado desenvolvido a partir da seção em que o gradiente de pressão se mantém constante.

A entrada da seção de teste trata-se de uma singularidade responsável por uma perda de pressão local. Para determinado comprimento a jusante de um elemento singular escoamento se reestabelece e ocorrem gradientes de pressão similares aos observados para condição desenvolvida a montante da singularidade.

A partir de medições para curva em U com diâmetros para tubos horizontais de 12,7 mm e 25,4 mm e com fluido de trabalho R-12, Traviss e Rohsenow (1973) indicam que o gradiente de pressão para um comprimento 10D a jusante da curva apresenta desvio inferior a $\pm 10\%$ do valor do gradiente de pressão para escoamento desenvolvido a montante da singularidade. Eles avaliaram o gradiente de pressão a partir da seção de entrada para segmentos sucessivos com comprimentos de 10D.

Curvas de 90° posicionadas verticalmente foram estudados por Azzi e Friedel (2005) para água/ar resultando distâncias de 30D para o reestabelecimento do gradiente de pressão. No experimento destes autores, o diâmetro interno utilizado foi de 30 mm e o raio de curvatura da curva variando entre 120 mm e 450 mm.

Padilla et al. (2011) determinaram, em diferentes regiões, o gradiente de pressão para escoamento de R-410, para tubos horizontais com diâmetro variando entre 7,9 mm e 10,85 mm.

Os resultados indicaram que o gradiente de pressão determinado a partir de um comprimento $20D$ a jusante da singularidade não apresenta diferenças marginais em relação ao gradiente medido a partir de $50D$.

Mandal e Das (2001) avaliou a pressão local a montante e a jusante de um retorno posicionado horizontalmente que compreende ângulos de 45° , 90° , 135° e 180° . Os resultados indicam que para comprimentos superiores a $35D$ a jusante, e $30D$ a montante, da singularidade o valor do gradiente de pressão é similar ao observado para condição desenvolvida.

Com base nos resultados indicados optou-se por tratar a seção de entrada como uma singularidade estabelecendo para a seção de teste um comprimento de entrada para a primeira tomada de pressão de aproximadamente de $30D_H$.

Além do fato da seção de entrada ser tratada como uma singularidade, se considera a existência entre o misturador e a entrada da seção de teste, uma seção circular em polietileno e comprimento aproximado de $320D_H$. Esta seção tem também como objetivo minimizar os efeitos do misturador no estabelecimento do padrão de escoamento.

4.4. MISTURADOR

Em estudos envolvendo escoamentos de misturas compostas por um gás não condensável e um líquido, o misturador utilizado para gerar o escoamento bifásico pode influenciar o estabelecimento do padrão e a distribuição das fases. Tal fato tem sua probabilidade incrementada com a redução do diâmetro do canal, pois efeitos de tensão superficial que tendem à distribuição das fases tornam-se preponderantes com a redução das dimensões da seção transversal do canal. Assim, no presente estudo, atenção especial foi dada de forma a reduzir efeitos do misturador.

Vários métodos de mistura em estudos envolvendo canais de diâmetro hidráulico reduzido foram levantados na literatura e encontram-se descritos no APÊNDICE C. Neste capítulo apresentam-se apenas os métodos de mistura avaliados experimentalmente no presente estudo e os resultados por eles proporcionados.

O primeiro método avaliado consistiu no estabelecimento da mistura através de uma união direta em Y. Esta se trata de uma configuração observada frequentemente em microreatores. Para o misturador com união tipo Y identificou-se oscilações relevantes na vazão indicada pelo flutuador do rotâmetro da fase gasosa, não ocorrendo escoamento estável. Isto se

deu pelo ingresso intermitente de água na linha de ar, impedindo o escoamento contínuo da fase gás a montante da união. Em seguida, nesta região a pressão se eleva localmente até expulsar o líquido que, em forma periódica retorna na linha de ar, com este processo repetindo-se ciclicamente.

Visando estabilizar a vazão indicada pelo rotâmetro, instalaram-se válvulas de retenção em ambas as linhas a montante do misturador de forma a evitar o retorno de uma das fases como resultado da maior pressão em uma das linhas. Nesta configuração, gás era acumulado a montante da válvula e expelido intermitentemente. Posteriormente, de forma a evitar efeitos de intermitência no escoamento devido aos dispositivos responsáveis pelas misturas das fases, eliminaram-se as retenções e instalou-se uma válvula micrométrica unidirecional da Swagelok, modelo B-SS4, na linha de ar a montante da união em Y. Tal configuração requer uma pressão mínima na entrada de 0,3 Mpa, e proporciona vazões estáveis através dos rotômetros, no entanto para ela verificou-se que a água inunda parcialmente a linha de ar na região compreendendo a válvula micrométrica e a união em Y, e pistões líquidos são expulsos periodicamente. Tal configuração favorecia escoamento caracterizado por pistões de líquido intercalados por bolhas dispersas.

Finalmente, desenvolveu-se a configuração ilustrada na Fig. 4.18. Nela a mistura se dá através de um meio poroso com água fluindo a partir de sua região inferior e ar, que esco a partir da válvula de agulha, sendo injetado radialmente. Através desta configuração a injeção ocorre de forma homogênea devido à mistura se estabelecer através do meio poroso, dificultando a formação intermitente de fases contínuas e promovendo a formação de bolhas discretas com dimensões reduzidas, apresentando diâmetros típicos entre 0,8 mm e 2 mm.

Figura 4.18 Misturador baseado em meio poroso e injeção radial de ar.

A configuração proposta, através da geração de bolhas discretas, permite que o padrão de escoamento resulte dos mecanismos físicos dominantes, isto é, caso efeito de turbulência

predominem, o padrão de bolhas dispersas se estabelece ao longo da seção de desenvolvimento, caso contrário, a densidade elevada de bolhas proporciona que estas coalesçam e o padrão intermitente ocorra.

4.5. CIRCUITO SECUNDÁRIO

Um circuito auxiliar foi utilizado para o resfriamento da água do circuito principal. O resfriamento se dá no reservatório-separador, o qual consiste em um recipiente com capacidade de armazenamento de 10 litros em aço inoxidável AISI 304, constituído de parede dupla, no interior das quais circula água resfriada através de um circuito de compressão de vapor, conforme esquematicamente ilustrado na Fig. 4.19.

Figura 4.19 Diagrama esquemático do circuito secundário.

A água de resfriamento, a partir de um reservatório isolado termicamente, desloca-se em circuito fechado através de uma bomba centrífuga fabricada pela GRUDFOSS, modelo NXDP-2, com potência nominal de 0,37 kW/220V e vazão máxima 8,3 m³/hr. Um controlador PID fabricado pela SALCAS, modelo TCM44, com base no sinal de um termopar tipo K cuja junta quente encontra-se no reservatório de água resfriada, atua diretamente na bomba centrífuga, mantendo sua operação por um período estabelecido controlador PID, de forma a manter a água armazenada no reservatório-separador a uma temperatura de 18° C.

No interior do reservatório de água resfriada encontra-se uma serpentina em cobre com diâmetro interno de 6,5 mm na qual evapora refrigerante R22. Esta serpentina é componente de um sistema de compressão de vapor que inclui ainda (i) um condensador tipo tubo-aleta contendo um ventilador da ELGIN, modelo 11-B, (ii) um compressor hermético da EMBRACO, modelo FG70AK e (iii) um filtro secador da INNERCO, e como dispositivo de expansão, (iv) um tubo capilar com diâmetro externo de 1,07 mm. Este sistema opera intermitentemente através de um termostato com regulação manual ligando ou desligando o compressor, com base na temperatura da água do reservatório de água resfriada.

4.6. SISTEMA DE FORNECIMENTO DE AR COMPRIMIDO

Considerando que os testes foram executados para vazões de gás reduzidas, utiliza-se ar comprimido da rede pneumática interna do laboratório para alimentar o aparato experimental. A rede interna é alimentada por um compressor produzido pela SCHULZ do tipo pistão rotatório, modelo PSV 20BP. O compressor está programado para funcionar intermitentemente de forma de manter a pressão no seu reservatório entre 7 a 10 bar (100 a 150 psi).

O ar comprimido proveniente da rede tem sua pressão regulada e é filtrado através de uma válvula marca E.MC modelo BEFR4000. A válvula possui um elemento poroso filtrante que retém partículas com dimensões superiores a 40 μm . Ela também permite a regulação da pressão na sua saída entre 0 e 0,85 Mpa. A válvula é interligada a rede de ar comprimido através de tubulação flexível de diâmetro interno de 6.35 mm ($\frac{1}{4}$ ") conectada mediante engates rápidos. A saída também se dá através de tubulação flexível, encontrando-se a jusante o sistema de rotâmetros em paralelo para medição da vazão de ar.

4.7. INSTRUMENTAÇÃO

Neste estudo utilizou-se para o controle da bancada, monitoramento e gravação de dados um computador pessoal da DELL com processador AMD Sempron LE-1300 com velocidade de 2,3 GHz e 3 GB de memória RAM, e um sistema de aquisição de dados da National Instruments contendo os seguintes componentes: (i) um módulo para termopares com entrada analógica modelo NI USB-9211 com 4 canais e resolução de 24 bits, o qual suporta

termopares tipo J, K, R, S, T, N, E, e B e (ii) um módulo multifuncional NI USB-6009 com 8 entradas analógicas (14 bits, 14 kS/s) e 8 saídas analógicas (12 bits, 150 S/s). Os dois módulos são conectados ao PC mediante canais USB.

O primeiro módulo NI USB-9211 recebe dos termopares tipo K sinais de tensão elétrica da ordem de 10^{-6} , os quais o módulo amplifica internamente. A temperatura de junta quente é internamente calculada pelo módulo, compensando a temperatura da junta fria, fornecida por termistor localizado dentro do módulo.

O segundo módulo NI USB-6009 recebe sinal de tensão elétrica entre 0 e 10 V. Devido ao fato dos transdutores de pressão absoluta emitirem sinal de corrente, utiliza-se uma resistência termoestável de 250 ohms, de forma que a sinal de entrada dos módulos conectado em paralelo aos terminais da placa de aquisição seja tensão. A Fig. 4.20 ilustra um diagrama esquemático da instalação dos sensores de pressão.

Figura 4.20 Esquema da instalação de sensores de pressão diferencial e absoluta.

Foram instalados filtros físicos RC de segunda ordem a jusante dos transdutores para reduzir ruídos dos sinais adquiridos. Conforme ilustrado na Fig. 4.20 o demodulador do transdutor de pressão diferencial da Validyne é alimentado diretamente a partir da rede elétrica, enquanto os sensores de pressão absoluta são alimentados por uma fonte de corrente contínua fabricada pela PWM STEADY, modelo S-75-24 com saída de 24 V.

Elaborou-se em Labview 12.0 um programa para aquisição, monitoramento e gravação de dados. A Fig. 8.1 ilustra a interface do programa o qual se encontra no APÊNDICE A.

A determinação da vazão de água na seção de teste se dá a través deste programa em Labview. Realiza-se a regulação da vazão de água que fornece a bomba de engrenagens, mediante o controle da velocidade do motor por um variador de frequência que é comunicado com o módulo de aquisição NI USB-6009. A comunicação entre o variador e a placa NI USB 6009 é analógica, com tensão de alimentação entre 0 V a 5 V, atuando de forma a variar frequência de alimentação do motor de 0 a 60 Hz.

A seguir são descritos os instrumentos e dispositivos de medida utilizados no aparato experimental:

- i. **Transdutor diferencial de pressão** produzido pela Validyne, modelo DP15. Este transdutor foi utilizado na determinação da diferença de pressão ao longo de um determinado comprimento da seção de testes, conforme ilustrado na Fig. 4.21.

Figura 4.21 Instalação do transdutor de pressão diferencial.

O transdutor utilizado tem um tempo de resposta de 1 ms, é compatível com gases e líquidos e permite operar para amplas faixas de diferença de pressão devido ao seu diafragma ser intercambiável. No presente estudo utilizou-se o diafragma N° 30 indicado para diferença de pressão de até 8,6 kpa.

Para evitar danos à membrana do transdutor, este é instalado segundo configuração ilustrada na Fig. 4.21, permitindo que este possa ser isolado da seção de teste mediante o fechamento das válvulas de esfera ①. Por recomendação do fabricante se instala também uma

válvula de esfera adicional ③ que permite igualar a pressão em ambos os terminais do transdutor e consequentemente do diafragma. As válvulas de esfera ② possibilitam calibrar o transdutor, interligando apenas uma das válvulas com o calibrador digital de pressão marca MENSOR, modelo 2500 com uma precisão de 0,01% do valor indicado, enquanto a segunda válvula é mantida aberta. Durante a calibração, as válvulas ① e ③ são mantidas fechadas.

O sinal emitido pelo transdutor é transmitido ao demodulador que codifica e amplifica, proporcionando um sinal de saída que é ajustado entre 0 a 10 V através dos controles do demodulador (zero e span).

ii. **Transdutor de Pressão Absoluta** (0 a 6 bar) fabricado pela Danfoss, modelo 060G3040. Ele encontra-se instalado logo a jusante dos rotâmetros de ar e sua medição é utilizada na estimativa das propriedades do ar. O seu sinal de saída é de 4 a 20 mA com tempo de resposta máximo de 4s. Um segundo transdutor de Pressão Absoluta (0 a 6 bar) similar ao anterior utilizado para a determinação da pressão do escoamento na seção de teste na região distante $28,8D_H$ da entrada.

iii. Os **Termopares**, cuja junção quente é indicada por T_1 , T_2 , T_3 e T_4 na Fig. 4.2 são de tipo K. Os fios soldados são de cromel e alumel de diâmetro de 0,125 mm, correspondendo a um diâmetro de junta quente aproximado de 0,250 mm. O termopar T_3 é instalado conforme descrito no item 4.3. Os termopares T_1 e T_2 são utilizados para estimar as propriedades do ar e água nas respectivas linhas de alimentação. O termopar T_4 foi instalado a jusante da seção de testes para avaliar a redução de temperatura da mistura em relação o termopar T_3 . Os termopares T_1 , T_2 e T_4 estão dispostos dentro de um bulbo de cobre instalados conforme ilustra na Fig. 4.22.

Figura 4.22 Ilustração esquemática da instalação dos termopares T_1 , T_2 e T_4 .

iv. **Rotâmetros para Ar** de área variável fabricado pela Cole-Parmer. Estes instrumentos encontram-se instalados em paralelo. O primeiro é modelo FR2A12BVBN-CP, e tem uma faixa de operação de 0,04 a 0,5 lpm com flutuador de vidro. O segundo modelo FR4A40BVBN-CP

com uma faixa de vazões de 0,4 a 5 lpm com flutuador de 316 SS. Suas pressões e temperaturas máximas de operação são 6,9 bar e 65°C respectivamente.

As seções de entrada destes rotâmetros contém uma válvula de agulha para regular a vazão de gás, a qual é fornecida diretamente a partir da posição do flutuador. A redução de pressão através do rotâmetro não é reportada pelo fabricante Coleparmer para estes modelos.

Devido ao fato as condições de operação neste estudo serem distintas da qual ele foi calibrado, adotou-se procedimento de correção de leitura descrito no item 5.3.

- v. **Rotâmetro para Água** de área variável fabricado pela Cole-Parmer, modelo PMR1-010565. Este rotâmetro foi instalado a jusante da bomba de engrenagens e tem como função fornecer a vazão de água através da seção de teste. Sua faixa de operação é de 96 a 1881 ml/min e possui flutuador de Carboloy. O fabricante indica pressão e temperatura máximas de operação são 13,6 bar (200 psi) e 121°C respectivamente. Este rotâmetro também possui válvula de agulha na seção de entrada para regulagem da vazão de água.

A determinação da vazão de água é obtida a partir da posição do flutuador na escala do rotâmetro, subdividida em 150 mm. A indicação de posição é correlacionada com a vazão, sendo a mínima leitura 10 mm e a máxima 150 mm, que correspondem a 96 ml/min e 1881 ml/min, respectivamente, segundo a curva de calibração fornecida pelo fabricante.

- vi. Dois **Emissores Laser** com seus respectivos **Sensores** foram instalados logo a jusante das tomadas de pressão do transdutor diferencial. Os emissores são fabricados pela empresa REO, modelo 31007 tipo He-Ne, e o feixe laser tem comprimento de onda de 633 nm (vermelho), com cada emissor possuindo fontes de alimentação próprias. Os sensores fotodiodos são fabricados pela Newport, modelo 818-BB-21, e podem detectar comprimentos de onda na faixa 300-1100 nm, com o detector de 4 mm feito de silicone e com tempo de resposta inferior a 0,3 ms.

Os dispositivos diodo/sensor-laser foram instalados de forma que a radiação do emissor atravessasse o canal e a intensidade do sinal, alterada pelo escoamento, seja captada pelo fotodiodo. Sinais de tensão de 1 a 11 V foram monitorados e gravados pelo sistema de aquisição da NI utilizando o módulo de aquisição NI USB-6009.

- vii. **Câmera de captura de imagens de alta velocidade** tipo CMOS marca Optronic, modelo CamRecord 600, foi utilizada para registro de imagens do escoamento a partir de uma distância de 750 mm ($125D_H$) a partir da entrada da seção de teste. A velocidade de captura da câmara

depende da resolução: com alta resolução de 1280 x 1024 pixels captura até 500 imagens por segundo, e para resolução de 1280 x 4 pixels captura 100.000 imagens por segundo.

A câmera foi fixada a estrutura de alumínio utilizando dois suportes fabricados pela Newport, modelo M-360-90. Também foi utilizada uma câmera digital tipo CMOS marca Nikon D5200 com 24,1 milhões de pixels efetivos e com máxima velocidade do obturador de 1/4000 s. Para iluminar o escoamento utilizou-se um refletor de LED branco de 30 W marca Ilucron, modelo AP-DRV-30W, com dissipação de calor desprezível. Foram instalados dois capacitores de 15 mF para retificar sua sinal de alimentação de corrente.

viii. **Inclinômetro** de utilização manual produzido pela Bosch, modelo DNM 60 L. Este instrumento foi utilizado na determinação do ângulo da inclinação em relação ao plano horizontal e da rotação da seção de teste relativa ao seu eixo longitudinal. A leitura do ângulo se dá no próprio instrumento.

4.8. ESTIMATIVAS DE INCERTEZAS

Apresenta-se neste item uma análise da incerteza nas grandezas medidas e a sua propagação nos parâmetros estimados. Utilizaram-se para determinar incertezas experimentais as especificações técnicas e manuais fornecidos por fabricantes e adotou-se como base o procedimento proposto por Abernathy e Thompson (1973) para termopares. Na Tab. 4.2 são ilustradas as incertezas nos dado medidos.

Tabela 4.2 Estimativas de incerteza nos parâmetros medidos.

Instrumento / Parâmetro	Incerteza	Instrumento / Parâmetro	Incerteza
Transdutor Diferencial de Pressão	$\pm 0,1 \Delta P$ [kPa]	Rotâmetro Ar 2 (0,4 a 5 lpm)	$\pm 0,15$ [lpm]
Transdutor de Pressão Absoluto 1 e 2	$\pm 4,8 P$ [kPa]	Rotâmetro Água	$\pm 37,62$ [ml/min]
Termopar T_1	$\pm 0,12 T$ [°C]	Inclinômetro	$\pm 0,05$ [°]
Termopar T_2	$\pm 0,10 T$ [°C]	Distância entre pontos de medida de pressão diferencial	$\pm 0,5 L$ [mm]
Termopar T_3	$\pm 0,12 T$ [°C]	Espessura do canal W	$\pm 0,1 L$ [mm]
Termopar T_4	$\pm 0,11 T$ [°C]	Altura do canal S	$\pm 0,1 L$ [mm]
Rotâmetro Ar 1 (0,04 a 0,5 lpm)	$\pm 0,025$ [lpm]		

Realizou-se a estimativa das incertezas dos parâmetros estimados através da propagação das incertezas dos parâmetros medidos com auxílio do programa EES. O calculo está baseado

no procedimento proposto por Taylor e Kuyatt (1994) segundo o qual a incerteza em uma medida U_{X_i} se propaga em uma grandeza estimada Y conforme a seguinte equação:

$$U_Y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial U}{\partial X_i} \right)^2 U_{X_i}^2} \quad (4.1)$$

A Tab. 4.3 apresentam as incertezas dos parâmetros medidos.

Tabela 4.3 Estimativas de incerteza nos parâmetros medidos.

Instrumento / Parâmetro	Incerteza
Gradiente de pressão	$\pm 0,167$ [kPa/m]
Velocidade Mássica	$\pm 7,9$ [kg/m ² s] (G=250 kg/m ² s)
	$\pm 16,86$ [kg/m ² s] (G=534 kg/m ² s)
	$\pm 21,17$ [kg/m ² s] (G=704 kg/m ² s)
Velocidade Superficial da fase Líquida	$\pm 0,008$ [m/s] (G=250 kg/m ² s)
	$\pm 0,016$ [m/s] (G=534 kg/m ² s)
	$\pm 0,02$ [m/s] (G=704 kg/m ² s)
Velocidade Superficial da fase Gasosa	$< \pm 0,15$ [m/s]
Diâmetro hidráulico seção de teste	$\pm 0,0715$ [mm]
Área seção transversal seção de teste	$\pm 0,8846$ [mm ²]

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

5.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve os procedimentos experimentais e de regressão de dados adotados no presente estudo. Ele ainda apresenta os métodos e os resultados de validação do aparato experimental e o procedimento de caracterização dos padrões de escoamento.

5.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios experimentais foram realizados adotando-se a seguinte sequência de procedimentos:

- i. Os ensaios eram iniciados com o ajuste do posicionamento da seção de testes. Primeiramente, rotacionava-se a seção de teste com ela posicionada horizontalmente, de acordo com o ângulo θ desejado. Após verificado este ângulo com o inclinômetro, ajustava-se a sua inclinação em reação ao plano horizontal, a qual era com o auxílio do inclinômetro.
- ii. Uma vez estabelecido o posicionamento da seção de testes, o transdutor diferencial era removido do circuito visando preparar a calibração posterior deste instrumento. Para isto, os componentes internos eram inspecionados e secos. Ambas as válvulas de esfera (indicadas por ① na Fig. 4.21), localizadas entre os terminais do transdutor e os conectores instalados na seção de teste, eram abertas com o intuito de abrir o subcircuito para o ambiente. A partir daí a linha de ar era pressurizada, a válvula de agulha à montante do misturador e os rotâmetros eram

abertos visando eliminar a água armazenada na seção de teste e no subcircuito do transdutor diferencial.

- iii. Uma vez a água retirada do circuito do transdutor diferencial, este dispositivo era instalado na sua posição original e mantido isolado do circuito da seção de teste através do fechamento das duas válvulas de esfera ①, para evitar o ingresso de água e possíveis danos à membrana, caso a bomba fosse acionada. A válvula de desvio ③ na Fig. 4.21 que, comunica as tomadas do diferencial de pressão, era mantida aberta durante este procedimento, de forma a igualar a pressão em ambos os lados do diafragma evitando possíveis danos a este componente. Ao final deste procedimento a linha de ar é despressurizada e a válvula de agulha e os rotômetros são fechados.
- iv. Neste ponto, o transdutor diferencial era calibrado utilizando-se um dispositivo digital marca MENSOR, modelo 2500. Para isto, as duas válvulas de esfera, indicadas como ② na Fig. 4.21, eram abertas. Por um dos lados do diafragma injeta-se ar através de uma bomba manual conectada à linha da válvula de esfera ②, e cuja pressão era medida pelo dispositivo digital, com precisão de 0,01% do valor indicado. O outro lado do diafragma encontrava-se aberto para o ambiente. O transdutor era calibrado correlacionando seu sinal de tensão com a diferença de pressão indicada pelo dispositivo digital para uma faixa entre 0 e 8,5 kPa, variando segundo incrementos sucessivos de 0,5 kPa.
- v. A seção de teste estando posicionada e o transdutor calibrado, fechava-se a válvula de esfera ② e a válvula de esfera ③ é mantida aberta. Então, retira-se o calibrador digital e aciona-se o circuito de resfriamento de forma a manter o valor da temperatura da água próximo a 20 ° C.
- vi. Uma vez estabelecida a temperatura da água próxima a 20 °C, iniciou-se a operação da bancada, com a circulação inicial apenas de água, através do acionamento da bomba de engrenagens. Através do variador de frequência atuando na rotação da bomba, ajustou-se manualmente a vazão de líquido. Verificou-se então a temperatura fornecida pelos termopares localizados a montante, a jusante e no interior da seção de testes. Os valores indicados deviam coincidir com o a temperatura da água do reservatório, determinada através de um termopar localizado no interior do reservatório–separador.
- vii. Após verificar a pressão indicada pelo transdutor de pressão absoluto que deve ser próxima da atmosférica, as válvulas ① que isolam o circuito são abertas de forma a comunicar o transdutor diferencial de pressão com a seção de teste. Aí então a válvula de desvio ③ é fechada.

- viii. Verifica-se o correto funcionamento do transdutor diferencial, comparando o valor por ele indicado com valores de perda de pressão obtidos através de métodos da literatura reconhecidamente precisos para escoamentos monofásicos. Para determinar o fator de atrito utilizou-se os seguintes métodos: (i) para escoamentos com Reynold inferior a 2300 utilizou-se o método de Shah e London (1978) para canais retangulares e (ii) e para escoamentos com Reynold superior a 2300 utilizou-se o método de Blasius com o diâmetro hidráulico como dimensão característica. Avalia-se também o valor indicado pelo transdutor diferencial de pressão com a bomba de engrenagens desligada, o qual deve indicar zero. Para condições com deslocamento de líquido o transdutor diferencial de pressão deve indicar o valor correspondente à parcela do atrito;
- ix. Com a bomba em operação acionam-se os emissores lasers, cujos respectivos sensores devem indicar um valor máximo e constante no tempo igual a 11 V, correspondente a presença apenas de líquido na seção de teste. Caso ocorra a presença de bolhas no escoamento, os sensores indicam valores valores periódicos inferiores a 11 V, e o ar do sistema deve ser eliminado;
- x. Iniciam-se os testes com escoamento água/ar. Primeiro a linha de alimentação de ar é pressurizada mediante abertura da válvula de regulação de pressão. O rotâmetro correspondente à vazão menor é aberto totalmente e a válvula de agulha que controla a vazão de gás é aberta também. A partir daí aguarda-se até que a vazão de gás se estabilize, para o que é necessário um período entre 30 a 45 minutos.
- xi. Na linha de ar, a válvula de agulha a montante do misturador é ajustada, visando fixar a vazão no rotâmetro. Foi adotada a condição inicial 0,08 lpm e pressão a jusante 0,3 Mpa. Através do variador de frequência atuando na rotação da bomba ajusta-se uma vazão de líquido correspondente a 96 ml/min, vazão adotada como condição inicial. Uma vez atingido regime permanente, caracterizado pela estabilidade dos flutuadores nos rotâmetros, dados são adquiridos durante 1 minuto e o arquivo gerado é salvo. Durante este processo realiza-se simultaneamente captura de imagens do escoamento com a câmera de alta velocidade;
- xii. A escala do rotâmetro de água compreende um comprimento de 150 mm, subdividido em divisões de 10 mm. A posição do flutuador do rotâmetro, medida a partir do zero na escala de 150 mm, relaciona-se com a vazão de água segundo uma curva de calibração fornecida pelo fabricante. Para o presente estudo, os ensaios foram realizados tendo como início uma vazão correspondente a uma altura de 20 mm. Este valor é elevado progressivamente segundo intervalos de 10 mm até atingir 140 mm. Para cada condição, os dados foram registrados e imagens do escoamento capturadas. Para cada condição de velocidade superficial da fase

líquido variava-se a vazão volumétrica da fase gás segundo os seguintes valores: 0,12, 0,14, 0,16, 0,18, 0,2, 0,24, 0,3 e 0,4 lpm. Para atingir vazões de gás superiores (0,5 a 3,6 lpm) a vazão de líquido era mantida constante e regulava-se a válvula de agulha de forma a permitir a elevação gradual da vazão da fase gás de acordo com os seguintes valores: 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8, 2, 2,4, 2,8, 3 e 3,4 lpm. Em condições caracterizadas pela impossibilidade de aumento da vazão de gás, a pressão na alimentação era elevada em 1 bar, através do ajuste da válvula reguladora de pressão á montante dos rotâmetros.

- xiii. Quando os ensaios para uma determinada posição da seção de testes eram finalizados, realizava-se um ensaio adicional para uma vazão do líquido constante de 981 ml/min, com aumentos progressivos da vazão de gás a partir de 0,08 lpm. Desta forma era possível comparar resultados obtidos para uma mesma condição após percorrido determinado espaço de tempo caracterizando o início e o final dos testes. Isto permitia verificar a permanência da calibração do transdutor diferencial durante a realização dos testes.
- xiv. Uma vez verificado diferenças nas curvas descritas no item anterior dentro da incerteza do instrumento, o procedimento é repetido a partir do item (i) para uma nova posição da seção de testes, e um novo conjunto de dados é obtido.

5.3. REDUÇÃO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Um procedimento de redução de dados foi adotado de forma a obter a partir dos sinais dos transdutores, os resultados experimentais segundo parâmetros comumente utilizados em escoamentos bifásicos. Neste procedimento utilizou-se propriedades de transporte estimadas segundo o programa EES (Engineering Equation Solver) versão V9.226/2012.

Para a determinação das vazões volumétricas, se fez necessário corrigir a indicação do flutuador devido aos rotâmetros operarem em condições distintas daquelas para as quais foram calibrados. Em rotâmetros para gases utiliza-se um fator de correção, $f_{OPERAÇÃO}$, que considera efeitos de alteração no fluido de trabalho, pressão e temperatura em relação as condições para qual os rotâmetros foram calibrados. Este fator é dado segundo Delmée (2003) por:

$$f_{OPERAÇÃO} = \sqrt{\frac{(\rho_{FLUTUADOR} - \rho_{REF})}{(\rho_{FLUTUADOR} - \rho_{FLUIDO})} \cdot \frac{\rho_{FLUIDO}}{\rho_{REF}}} \quad (5.1)$$

onde ρ_{REF} é a densidade de referencia de ar a 1 atm e 20 °C. A partir daí, as vazões volumétricas do ar, indicadas pelos rotâmetros, são corrigidas através da seguinte equação:

$$Q_{ROT} = Q_{MED} \cdot f_{OPERAÇÃO} \quad (5.2)$$

Para rotâmetros que operam com líquidos, Chattopadhyay (2006) indica a necessidade de correção de efeitos devido a variação da viscosidade apenas quando o valor **VIC** (Viscosity Immunity Ceiling) definido equação abaixo, é inferior a um valor empírico fornecido pelos fabricantes.

$$VIC = \mu_L \sqrt{\frac{\rho_{FLUTUADOR} - \rho_{ÁGUA}}{(\rho_{FLUTUADOR} - \rho_{FLUIDO}) \rho_{FLUIDO} \rho_{ÁGUA}}} \quad (5.3)$$

No caso do fluido de trabalho seja água o VIC é a própria viscosidade cinemática do fluido de aproximadamente 1 cSt (para 20°C). O fabricante Coleparmer não menciona valores do VIC para os rotâmetros utilizados no presente estudo, entretanto a partir de manuais de outros fabricantes verificam-se os seguintes valores de referência: Brooks Instruments VIC = 1cSt para flutuadores esféricos de carboloy; ABB indica VIC > 1,1 - 16.8 cSt. Silla (2003) indica VIC > 1,1 - 16.8 cSt. No presente estudo a operação dos rotâmetros ocorre para viscosidade de aproximadamente 1cSt, assim, próxima a condição de calibração do instrumento. Desta forma, considerando também o fato do fabricante Coleparmer não indicar uma correção, esta não foi adotada.

Variações na umidade absoluta do ar comprimido podem resultar em diferenças entre a vazão de ar através do rotâmetro e seu valor ao longo da seção de teste. A Fig. 5.1 ilustra a variação da densidade relativa do ar úmido em relação ao ar seco, com alterações da umidade relativa e pressão absoluta para uma temperatura de bulbo seco de 20°C, desta forma similar à temperatura ambiente do laboratório.

Figura 5.1 Efeito da umidade relativa na variação da densidade do ar.

Verifica-se nesta figura que, as densidades do ar úmido apresentam desvios máximos próximos a 1%, desta forma inferior ao erro do rotâmetro. Tal resultado é desprezado no presente estudo. As vazões mássicas são calculadas a partir das leituras dos rotâmetros e com base na densidade local do fluido segundo as seguintes equações:

$$\dot{m}_L = Q_{ROT-ÁGUA} \rho_{L-ROT} \quad (5.4)$$

$$\dot{m}_G = Q_{ROT-GÁS} \rho_{G-ROT} \quad (5.5)$$

onde a densidade da água ρ_{L-ROT} é avaliada com base na temperatura e pressão fornecida pelo termopar T_1 e o transdutor de pressão absoluta p_2 , cujo local de medida encontra-se indicado na Fig. 4.2. A densidade do gás ρ_{G-ROT} é avaliada considerando a temperatura e pressão dado pelo termopar T_2 e o transdutor de pressão absoluta p_1 . As velocidades superficiais, também denominadas de fluxos volumétricos, foram calculadas segundo as seguintes expressões:

$$j_L = \frac{\dot{m}_L}{A \rho_{L-ST}} \quad (5.6)$$

$$j_G = \frac{\dot{m}_G}{A \rho_{G-ST}} \quad (5.7)$$

onde A é a área transversal da seção de teste, igual a $6,5 \times 6,0 \text{ mm}^2$ e ρ_{L-ST} e ρ_{G-ST} são as respectivas densidades locais das fases líquida e gasosa, avaliadas na temperatura T_3 e pressão p_2 . O título de vapor e a velocidade mássica são calculadas como:

$$G = \frac{\dot{m}_L + \dot{m}_G}{A} \quad (5.8)$$

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \quad (5.9)$$

Perda de pressão

Conforme o procedimento descrito no item 5.3, o transdutor de pressão diferencial foi calibrado correlacionando seu sinal de tensão com a diferença de pressão indicada pelo dispositivo digital MENSOR 2500, utilizando ar fornecido por uma bomba manual. O valor proporcionado pelo transdutor é Δp_{MEDIDO} , e corresponde aos efeitos da perda de pressão na seção de teste e da coluna de líquido entre as duas tomadas de pressão, conforme a seguinte equação:

$$\Delta p_{ST} = \Delta p_{MEDIDO} + \rho_{AGUA} \cdot g \cdot L_T \cdot \sin \phi \quad (5.10)$$

onde Δp_{ST} é a perda de pressão total na seção de teste. Para condições sem escoamento na seção de teste, com ela preenchida com água, correspondendo às condições com a bomba desligada, o valor de Δp_{MEDIDO} é nulo. Com a seção de teste inclinada de um ângulo ϕ , indicado pelo inclinômetro, às tomadas de pressão encontram-se em planos horizontais distintos espaçados de $L_T \sin \phi$, onde L_T é a distância ao longo do eixo longitudinal da seção de testes entre as duas tomadas do transdutor diferencial. Durante os ensaios assegurou-se que os capilares conectando a seção de testes aos terminais do transdutor diferencial estivessem preenchidos com apenas água, tanto para ensaios monofásicos como bifásicos.

A perda de pressão por atrito foi calculada subtraindo-se da perda total de pressão na seção de teste, estimada a partir do valor fornecido pelo transdutor diferencial, as parcelas gravitacionais e aceleracionais, conforme a seguinte equação:

$$\Delta p_{ATRITO} = \Delta p_{ST} - \Delta p_{GRAV} - \Delta p_{ACEL} \quad (5.11)$$

Definiu-se o gradiente de pressão por atrito como a razão entre a perda de pressão por atrito estimada a partir da Eq. (5.11), e a distância entre as duas tomadas do transdutor diferencial L_T .

A parcela aceleracional foi inicialmente avaliada segundo a seguinte equação:

$$\Delta P_{ACELERACIONAL} = G^2 \left\{ \left(\frac{x^2}{\alpha \rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_L} \right)_{SAÍDA} - \left(\frac{x^2}{\alpha \rho_G} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_L} \right)_{ENTRADA} \right\} \quad (5.12)$$

Para isto considerou-se o escoamento isotérmico e estimaram-se as propriedades na entrada e saída da seção de teste com base nas temperaturas e pressões locais. A fração de vazio foi estimada segundo o modelo de Bankoff (1960). A partir daí calculou-se a parcela aceleracional segundo a Eq. (5.12) obtendo-se valores inferiores a 0,1% da perda de pressão total. A utilização de métodos distintos para a previsão da fração de vazio superficial produziu resultados similares, tal procedimento permitiu desprezar a parcela aceleracional da perda de pressão na análise dos resultados. A parcela gravitacional da perda de pressão é calculada através da Eq. (5.13):

$$\Delta p_{GRAV} = L_T \rho_m g \sin(\phi) \quad (5.13)$$

com ρ_m dado por :

$$\rho_m = \alpha \cdot \rho_G + (1-\alpha) \cdot \rho_L \quad (5.41)$$

Fração de vazio

Diferentes procedimentos foram utilizados para a avaliação da fração de vazio superficial de acordo com o padrão de escoamento. No caso de padrão intermitente a fração de vazio foi correlacionada segundo o “drift flux model” proposto inicialmente por Zuber e Findlay (1965).

Os coeficientes empíricos C_0 e $\overline{u_{GJ}}$ foram estimados assumindo a velocidade da fase gás igual a da região frontal da bolha e através do ajuste de regressão dos dados experimentais segundo a seguinte expressão:

$$u_G = u_{BOLHA} = \frac{j_G}{\alpha} = C_0 J + \overline{u_{GJ}} \quad (5.15)$$

A velocidade da bolha alongada foi avaliada segundo dois métodos. O primeiro se baseou em imagens do escoamento de bolhas alongadas obtidas com uma velocidade de captura de 1000 imagens/segundo. A partir destas imagens avaliou-se a velocidade da bolha com base na distância percorrida por sua região frontal conforme a seguinte equação:

$$u_{BOLHA} = \frac{\Delta_{PIXEL} (Pix_f - Pix_i)}{(IM_f - IM_i) / IPS} \quad (5.16)$$

onde Δ_{PIXEL} é a dimensão de cada pixel em metros.

O deslocamento da frente da bolha, em pixels, é o valor da diferença entre a coordenada do pixel final e a do pixel inicial ($Pix_f - Pix_i$). As coordenadas são obtidas respectivamente da última (IM_f) e da primeira (IM_i) imagens capturadas, com $(IM_f - IM_i)$ sendo o número total de imagens e IPS a velocidade de captura.

Alternativamente, a velocidade da bolha foi estimada usando o tempo de defasamento entre dois sinais de laser que atravessam o escoamento, com os pares emissor/sensor distanciados 600 mm. Resultados para esta análise são gravados durante período de 6 segundos a partir daí os dados são normalizados de forma a indicarem valores entre 0 e 1. O sinal é convertido para binário mediante um critério desenvolvido por tentativa e erro, optando-se em adotar para valores superiores a 0,4 um sinal igual a 1, caso contrario 0. O resultado de um sinal binário obtido por este procedimento é ilustrada na Fig. 5.2.

Figura 5.2 Sinal do laser binária filtrada e suavizada em função do tempo.

Na Fig. 5.2 ilustra a sinal captada por um sensor da sinal de laser, e observa-se que a mudança repentina a sinal desde o valor máximo ao valor mínimo representa a passagem de uma bolha alongada.

Com os sinais dos dois sensores tratados aplica-se o método de correlação cruzada entre eles de forma a obter o defasamento entre os sinais correspondendo na Fig. 5.3 ao tempo relacionado ao sinal com maior amplitude.

Figura 5.3 Determinação do defasamento dos sinais laser por correlação cruzada.

A velocidade média das bolhas é obtida pela razão entre a distância de separação dos pares emissor/sensor e o tempo de defasamento entre os sinais. Visando validar este procedimento a Fig. 5.4 compara os resultados obtidos através de ambos métodos.

Figura 5.4 Comparação da velocidade da bolhas obtida por câmara de alta velocidade e por correlação cruzada entre as sinais de laser.

Segundo esta figura as velocidades das bolhas alongadas indicadas por ambos os métodos são próximas permitindo concluir que o método baseado na correlação cruzada dos sinais proporciona resultados satisfatórios.

No caso do escoamento segundo o padrão bolhas, estimou-se a fração de vazio a partir da contagem do número de bolhas em uma região do escoamento e a avaliação de uma dimensão média para um seguimento de imagem do escoamento conforme o seguinte procedimento:

1. Define-se a região da imagem para análise com as bordas horizontais da imagem coincidindo com as bordas do canal retangular e um comprimento superior a largura da imagem s .

Figura 5.5 Imagem do escoamento para canal horizontal, $j_G=0,1283$ m/s e $j_L=0,1953$ m/s.

2. A imagem é processada pela ferramenta de detecção de bordas com perfil circular “imfindcircles”, disponível no MATLAB R2012a. Esta ferramenta proporciona o raio

da circunferência, e as coordenadas correspondentes ao centro da circunferência em pixels.

Figura 5.6 Imagem do escoamento processada.

3. Dois métodos são aplicados para a determinação da fração de vazio. No primeiro calcula-se o volume das bolhas em um paralelepípedo de volume $s \cdot w \cdot z$, onde z é o comprimento da imagem medido na direção paralela ao eixo do canal. Determina-se então a fração de vazio volumétrica como a razão entre a soma dos volumes de cada bolha e o volume do paralelepípedo.
4. Para uma determinada imagem, a partir da caracterização das dimensões das bolhas, determina-se para 26 seções transversais especificadas aleatoriamente a área correspondente à fase gás delimitada pelas linhas caracterizando as interfaces líquido-vapor. Com base neste resultado calcula-se a fração de vazio superficial dada pela razão entre a parcela da superfície correspondente a fase gás e a área da seção transversal. A fração de vazio superficial é dada pela média aritmética dos valores avaliados para cada imagem.

Figura 5.7 Imagem do escoamento dividida em 26 seções transversais.

A Fig. 5.8 ilustra o perfil de fração de vazio ao longo do eixo longitudinal do canal, desenvolvido segundo o método mencionado acima para o canal posicionado horizontalmente com $j_G = 0,1283$ m/s e $j_L = 0,1953$ m/s.

Figura 5.8 Perfil de fração de vazio superficial em canal horizontal para $j_G=0,1283$ m/s e $j_L=0,1953$ m/s.

Para este caso, o valor médio da fração de vazio superficial ao longo do canal resulta em 0,084 e uma fração de vazio volumétrica avaliada segundo o primeiro método igual a 0,105.

5.4. CLASSIFICAÇÃO DE PADRÕES DE ESCOAMENTO

Realizou-se a classificação dos escoamentos segundo padrões utilizando-se técnicas subjetivas e objetivas. O método subjetivo de identificação de padrões é baseado na análise de imagens obtidas com uma câmera com velocidade de captura de 1000 imagens/segundo. Na caracterização adotou-se a terminologia proposta por Cheng et al. (2008) para classificação de padrões de escoamentos conforme descrita no item 2. Com base neste autor, distinguem-se os seguintes padrões: bolhas dispersas, intermitente e anular. Para escoamento vertical o padrão intermitente inclui os padrões pistonado e agitante. Analogamente para horizontal, os padrões pistonado e bolhas alongadas foram denominados como intermitente.

O método objetivo utilizou o algoritmo k-means, que consiste em um método que agrupa dados com características similares. Para um conjunto de n observações que devem ser classificadas em k grupos, estas observações serão classificadas no grupo que minimize a soma

das distâncias de cada observação ao centroide do grupo. Para determinar a distância ao centroide é necessário formar um vetor com dimensões $k \times 1$.

No presente trabalho se utilizou o MATLAB, que já têm implementado o algoritmo k-means. O vetor de entrada é de dimensões 3×1 , de forma de caracterizar os padrões segundo três grupos: bolhas, intermitente e anular. Os elementos do vetor foram selecionados de forma que a classificação do escoamento estivesse relacionada com o comportamento de perda de pressão e fração de vazio, parâmetros relevantes no projeto de trocadores de calor.

O primeiro elemento do vetor considera o desvio padrão do sinal de pressão diferencial, definido conforme a seguinte equação:

$$\sigma_{\Delta Pressão} = \sum_1^n \frac{(\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2}{n-1} \quad (5.17)$$

Neste estudo constatou-se que o desvio padrão deste sinal se eleva com o aumento da vazão da fase gás para uma vazão do líquido constante. Assim, o desvio padrão em escoamento anular é superior ao escoamento intermitente, e este superior ao de bolhas.

O segundo elemento do vetor considera a razão entre o desvio padrão e a média aritmética do sinal de pressão diferencial, definido conforme a seguinte equação:

$$\gamma_{\Delta Pressão} = \frac{\sigma_{\Delta Pressão}}{\bar{x}_{\Delta Pressão}} = \frac{\sum_1^n \frac{(\Delta P_i - \overline{\Delta P})^2}{n-1}}{\sum_1^n \frac{\Delta P_i}{n}} \quad (5.18)$$

Apenas a média aritmética não é um parâmetro adequado para classificar o escoamento considerando que não é uma função estritamente crescente. Pode ocorrer que a perda de pressão de um escoamento em bolhas tenha o mesmo valor que para escoamento intermitente para uma mesma vazão de líquido e diferentes vazões de gás. Já, o parâmetro adimensional γ do sinal de perda de pressão é mais representativo do escoamento, pois para escoamento segundo bolhas o valor do γ é inferior ao do escoamento intermitente mesmo com perda de pressão.

O último elemento considera o quociente entre o desvio padrão e a média aritmética do sinal de laser de saída na seção de teste e é dado pela seguinte equação:

$$\gamma_{SINAL-LASER} = \frac{\sigma_{SINAL-LASER}}{\bar{x}_{SINAL-LASER}} = \frac{\sum_1^n \frac{(SL_i - \overline{SL})^2}{n-1}}{\sum_1^n \frac{SL_i}{n}} \quad (5.19)$$

Com base nos resultados experimentais constatou-se que em escoamento em bolhas e anular a média aritmética do valor do sinal de laser é inferior à média em escoamento intermitente. Por outro lado a caracterização do escoamento utilizando apenas a média aritmética não diferencia os padrões bolhas e anular. Por outro lado, o desvio padrão em escoamento anular é inferior ao do escoamento segundo bolhas. Logo é razoável utilizar o parâmetro γ do sinal de laser, já que captura melhor características do escoamento.

5.5. DESCRIÇÃO DO BANCO DE DADOS

Resultados para perda de pressão e padrões de escoamento foram levantados para sete inclinações da seção de teste, compreendendo: horizontal 0° ($\phi = 0^\circ$), ascendente segundo ângulos de 30° , 60° e 90° e descendente segundo ângulos de 90° , 60° e 30° . Adicionalmente, para cada inclinação o canal foi rotacionado axialmente segundo ângulos de 45° e 60° . Estes testes resultaram em um banco de dados compreendendo 638 resultados experimentais para escoamentos bifásicos e 653 para monofásico, distribuídos conforme indicado na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 Descrição do banco de dados levantados.

Inclinação seção de teste (ϕ)	Rotação axial do canal (θ)	Dados para escoamento bifásico	Dados Monofásico
Horizontal, $\phi = 0^\circ$	$0^\circ / 45^\circ / 60^\circ$	968	203
Ascendente, $\phi = 30^\circ$	$0^\circ / 45^\circ / 60^\circ$	905	128
Ascendente, $\phi = 60^\circ$	$0^\circ / 45^\circ / 60^\circ$	945	146
Ascendente, $\phi = 90^\circ$	-	292	28
Descendente, $\phi = -90^\circ$	-	299	26
Descendente, $\phi = -60^\circ$	$0^\circ / 45^\circ$	363	39
Descendente, $\phi = -30^\circ$	$0^\circ / 45^\circ / 60^\circ$	866	83
TOTAL		4.638	653

Os 4.638 dados para escoamentos bifásicos se distribuíram da seguinte forma de acordo com os padrões de escoamento caracterizados através do método k-means: 1.107 dados experimentais correspondentes ao padrão bolhas dispersas (23,8% do banco de dados), 2.635 para o padrão intermitente (56,8%) e 832 segundo o padrão anular (17,9%).

A maior parcela dos dados foi levantada para títulos de vapor reduzidos, inferiores a 0,17%, conforme se ilustrado no histograma da Fig. 5.9. Isto se dá devido ao fato do volume específico da fase gás corresponder a aproximadamente 1000 vezes ao da fase líquida.

Figura 5.9 Distribuição do banco de dados segundo o título de vapor.

Entretanto, os dados foram distribuídos mais uniformemente em relação da fração de vazio volumétrica e da velocidade mássica.

Figura 5.10 Distribuição do banco de dados segundo a fração volumétrica.

Figura 5.11 Distribuição do banco de dados segundo a velocidade mássica.

Já em relação ao Número de Reynolds das fases líquido e gás conforme ilustra-se na Fig. 5.12, os dados se concentraram em valores de Reynolds reduzidos da fase gasosa, com 70% deles para Números de Reynolds inferiores a 370. Para Reynolds da fase líquida, houve uma maior uniformidade na distribuição de dados. Vale destacar que os Números de Reynolds ilustrados nesta figura foram calculados com base nas velocidades superficiais e no diâmetro hidráulico.

Figura 5.12 Distribuição do banco de dados segundo os Reynolds das Fases.

5.6. VALIDAÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

A validação do aparato experimental se deu através de comparações entre previsões de perda de pressão obtidas com base em métodos da literatura reconhecidamente precisos e resultados experimentais para escoamento monofásico da fase líquida. Nesta análise as propriedades da água foram estimadas a partir da temperatura e pressão fornecidas pelo termopar T_1 e o transdutor de pressão absoluto P_2 , respectivamente.

A validação foi realizada para a seção de teste segundo todos os posicionamentos avaliados. Resultados experimentais com erros inferiores a 30% em relação às previsões foram consideradas como indicadoras de validação do aparato. Os procedimentos de cálculo dos valores teóricos de perda de pressão para escoamento monofásico em canais retangulares encontra-se detalhados APÊNDICE B.

A Fig. 5.13 ilustra comparações entre resultados experimentais e as previsões para distintas inclinações. Utilizou-se para previsão do fator de atrito o método de Shah e London (1978) para escoamento laminar e a correlação de Blasius para escoamento em transição e turbulento. Adotou-se como Reynolds crítico de transição o valor de 2.300, como indicam a maior parte dos autores mencionados no APÊNDICE B.

Figura 5.13 Perda de pressão em escoamento monofásico.

Vale destacar que a Fig. 5.13 inclui dados coletados em datas diferentes para avaliar possíveis alterações na calibração do transdutor de pressão com o tempo. A Fig. 5.14 compara os resultados experimentais de perda de pressão por atrito e as respectivas previsões para orientações do canal variando entre $+90^\circ$ e -90° .

Figura 5.14 Comparação entre previsões e resultados experimentais de perda de pressão.

A Fig. 5.14 também inclui resultados para o canal rotacionado em relação a seu eixo longitudinal de acordo com ângulos de 45° e 60° . Conforme esperado, tal rotação não afetou os resultados experimentais e dados igualmente precisos foram obtidos. Pode-se concluir que a rotação do canal não tem influência significativa na perda de pressão em escoamento monofásico.

A Fig. 5.13 e 5.14 possibilitam concluir que o aparato experimental proporciona resultados de perda de pressão satisfatoriamente precisos. Resultados com desvios superiores a 30% indicados na Fig. 5.13 estão dentro da incerteza do instrumento.

A Fig. 5.15 ilustra comparações de resultados para perda de pressão em escoamento bifásico horizontal, que foram levantados com intervalos de 177 dias. Nela constata-se diferenças entre resultados obtidos em datas distintas para uma mesma condição experimental dentro da incerteza experimental da medição de perda de pressão.

Figura 5.15 Comparação de resultados experimentais para condições similares levantadas com intervalos de 177 dias.

CAPÍTULO 6

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Este capítulo envolve a apresentação, análise e discussão dos resultados experimentais levantados neste estudo. Ele inclui ainda comparações com modelos e métodos de previsão disponíveis na literatura. Novos métodos de previsão ou modificações daqueles já existentes são propostos quando necessários. Os temas são tratados segundo a seguinte sequência: padrões de escoamento, fração de vazio superficial e perda de pressão por atrito.

6.1. PADRÕES DE ESCOAMENTO

6.1.1. EFEITO DA INCLINAÇÃO

Neste estudo os seguintes padrões de escoamento foram classificados considerando os critérios subjetivos descritos no capítulo 2: bolhas, intermitente e anular. A Fig. 6.1 ilustra imagens destes padrões para escoamento horizontal. Esta figura também apresenta uma comparação entre mapas de escoamentos elaborados com base em visualizações e através de método de agrupamento de dados k-means.

Este método de agrupamento, não reconhece padrões de transição com características intermediárias, desta forma apresentando uma transição abrupta entre os padrões.

Figura 6.1 Comparação entre mapa para canal horizontal desenvolvido através de método subjetivo e segundo método k-means, $\theta = 0^\circ$.

Padrões com características intermediárias também foram identificados e são indicados por símbolos em forma de diamante na Fig. 6.1. O padrão transicional denominado neste texto por bolha-intermitente caracteriza-se por bolhas dispersas no meio líquido entre pistões. O segundo padrão de transição identificado neste estudo como intermitente-anular apresenta as fases segregadas com o líquido que escoando junto à parede e gás na região com a passagem intermitente de pistões de líquido com interface irregular.

O mapa de escoamento do canal inclinado 30° em escoamento ascendente é ilustrado na Fig. 6.2. De forma análoga que em escoamento horizontal, tem sido identificado padrão em bolhas, intermitente e anular, assim como regiões de transição com características intermediárias destes padrões. Destaca-se um favorecimento de padrão em bolhas em relação ao observado em canal horizontal, onde bolhas maiores são formadas para condições similares.

De forma análoga a Fig. 6.1, as figuras 6.2, 6.3, 6.4 e 6.6 ilustram imagens dos escoamentos e comparações entre os mapas determinados segundo critérios objetivos e subjetivos para escoamento ascendentes com a seção de teste segundo distintas inclinações.

Para o canal inclinado segundo um ângulo de 30° , a transição bolha-intermitente proporcionada pelo método k-means desloca-se para adireita em relação ao escoamento horizontal.

Figura 6.2 Comparação entre mapa para canal inclinado 30° desenvolvido com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means, $\theta = 0^\circ$.

A Fig. 6.3 ilustra os padrões de escoamento em canal horizontal e canal ascendente para $\phi = 30^\circ$ para velocidades superficiais próximas. Observam-se no canal inclinado diversas bolhas com diâmetros reduzidos circundando bolhas maiores com dimensões características inferiores ao diâmetro do tubo. Já para escoamento horizontal verifica-se um pistão de gás circundado por número reduzido de bolhas

Figura 6.3 Ilustração dos padrões de escoamento em canal horizontal e inclinado segundo ângulos de 30° para $\theta = 0^\circ$. (a) $j_G=0,3187$ m/s e $j_L=0,1436$ m/s e (b) $j_G=0,3088$ m/s e $j_L=0,1436$ m/s.

Já para escoamento ascendente segundo ângulo de 60° e condições similares à Fig. 6.3, formou-se pistões com interface frontal com perfil curvo.

Figura 6.4 Escoamento intermitente em canal inclinado 60° e $\theta = 0^\circ$ para $j_G=0,302$ m/s e $j_L=0,1436$ m/s.

Outro aspecto interessante ilustrado nas Figs 6.1 a 6.6 está relacionado com que estas imagens apresentam reduzidos efeitos de estratificação do escoamento, sendo praticamente imperceptíveis nestas figuras. Tais efeitos, caso relevantes resultariam na não uniformidade da espessura do filme líquido ao longo do perímetro do canal, para escoamento anular, e no escoamento de maior parcela do gás na região superior do canal. Vale ressaltar que as imagens foram capturadas com o eixo da câmera paralelo à direção da gravidade.

Na Fig. 6.5 apresenta-se o mapa de escoamento para canal inclinado em 60° . Observa-se que a transição bolha-intermitente desloca-se para valores de j_L superiores aos observados para a inclinação de 30° .

Figura 6.5 Comparação entre mapa para canal inclinado segundo ângulos de 60° desenvolvido com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means, $\theta = 0^\circ$.

A Fig. 6.6 apresenta os mapas com as respectivas imagens para escoamento vertical ascendente. Através da comparação das Figs. 6.4 e 6.6 constata-se que as transições baseadas na visualização do escoamento inclinado segundo 60° e vertical são próximos. Além disso, para escoamento vertical as transições segundo os critérios subjetivos e objetivo (k-means) são aproximadamente similares.

Figura 6.6 Comparação entre mapa desenvolvido para canal inclinado 90° com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means.

No que se refere a transição bolhas-intermitente na Fig. 6.6 constata-se que de uma maneira geral com o aumento da velocidade superficial da fase gás, o valor de j_L correspondente a transição também se eleva. Destaca-se nesta figura o comportamento distinto observado para a inclinação de 30° em relação as demais, caracterizado por escoamento segundo bolhas para velocidades superficiais da fase gás inferiores a 0,2 m/s.

A Fig. 6.7 ilustra as linhas de transição entre canal horizontal e canais inclinados com escoamento ascendente caracterizadas através do método de agrupamento de dados. Se observa que na região do mapa onde $j_L > 0,2$ m/s, a inclinação do canal favorece escoamento em bolhas, deslocando a linha de transição para j_G mais elevados em relação a canal horizontal.

Quando o canal inclina-se em 30°, na região do mapa em que $j_L < 0,2$ m/s, são identificadas bolhas dispersas, comportamento diferente ao observado nas outras inclinações.

Figura 6.7 Comparação entre mapa de escoamento para canal horizontal e ascendentes segundo método k-means.

De uma maneira geral, conforme ilustrado na Fig. 6.7 a transição intermitente-anular, ocorre para velocidades superficiais da fase gás entre 5 e 10 m/s. Para canal horizontal e inclinado segundo ângulo de 30° , esta transição ocorre para j_G aproximadamente constante e igual a 7 m/s.

No caso de escoamento vertical e inclinado segundo ângulo de 60° , a transição intermitente-anular se caracteriza inicialmente pelo decréscimo de j_G , com incremento de j_L . Para j_L superiores este comportamento de uma maneira geral se inverte ocorrendo o incremento de j_G de transição com o aumento de j_L .

Mapas para escoamentos descendentes inclinados segundo ângulos de -90° e -60° são apresentados na Fig. 6.8 e Fig. 6.9, respectivamente. Neles se observa padrões de escoamento bolhas, intermitente e anular, segundo classificação subjetiva segundo descrita no item 2.2.2. Os padrões apresentam características distintas das observadas para canais horizontais e ascendentes.

Figura 6.8 Comparação entre mapa desenvolvido para canal inclinado -90° com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means.

Figura 6.9 Comparação entre mapa desenvolvido para canal inclinado -60° com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means.

De uma maneira geral, observou-se a partir das imagens incluídas nos mapas que a transição entre padrões bolha e intermitente deu-se através do colapso progressivo de bolhas.

Através da comparação das Figs. 6.9 e 6.8 constata-se que o mapa de escoamento para canal inclinado segundo ângulo de -60° apresenta uma maior região de transição entre padrões. Uma análise das Figs. 6.8 e 6.9 permite concluir que as transições entre os padrões intermitentes e anular

caracterizadas segundo os critérios subjetivos e objetivo são quase coincidentes. O padrão bolhas caracterizado através de visualizações ocorre para condições de j_L e j_G similares. Vale ainda destacar a ampliação da região correspondente a escoamento anular para escoamento descendente em relação a ascendente.

Tal ampliação se dá principalmente para velocidades superficiais da fase líquido reduzidas, para as quais o líquido tende a escoar junto à superfície do canal como resultado de efeitos gravitacionais. Nestas condições, o aumento da velocidade da fase gás tende a elevar a velocidade do líquido na interface reduzindo a espessura do filme descendente.

A Fig. 6.10 compara os padrões para escoamentos ascendentes e descendentes. Observa-se segundo estas figuras que os escoamentos apresentam características diferentes segundo sua orientação.

Figura 6.10 Comparação entre mapa desenvolvido para canal inclinado -60° com método subjetivo e linhas de transição segundo método k-means.

Em escoamento vertical descendente de bolhas constatam-se uma tendência da fase gasosa de escoar no centro da tubulação, se afastando da região próxima da parede. Usui e Sato (1989) relaciona este fenômeno com a força de sustentação agindo na bolha e dirigida para o centro do canal. Escoamento segundo bolhas em escoamento vertical ascendente apresenta bolhas distribuídas em toda a seção transversal do duto, sendo distinguidas as de diâmetro maior escoando na região central do duto.

Escoamento intermitente em escoamento vertical descendente apresenta para j_L reduzidos interface na região frontal com perfil plano. Na Fig. 6.11 se ilustra o mapa de escoamento para canal

vertical descendente, onde é indicada a região em que foi constatado visualmente perfil plano na interface frontal do pistão.

Figura 6.11 Mapa para canal inclinado -90° com método subjetivo e segundo método k-means.

Já para escoamento intermitente em canal vertical ascendente foi identificado um pistão simétrico em relação ao eixo do duto, e a presença de uma esteira de bolhas na região posterior do pistão.

Escoamento anular em escoamento para canal descendente foi identificado para valores reduzidos de j_G . O líquido junto à parede escoa segundo um filme contendo bolhas discretas. Constatou-se na figura bolhas com diâmetros superiores e inferiores comparados com a espessura do filme líquido.

Já para canal vertical ascendente, escoamento anular foi observado para valores elevados de j_G . Constatou-se também a presença de bolhas dispersas no líquido junto à parede, mas com diâmetros inferiores que a espessura do filme líquido.

As transições entre padrões proporcionadas pelo método k-means para canal horizontal e escoamento descendente são comparadas na Fig. 6.12. Observa-se que a transição bolha-intermitente em relação a canal horizontal não é alterada significativamente para inclinações de -30° e -90° .

Para ambas inclinações padrão o bolhas se verifica apenas para j_L superiores a 0,2 m/s. Já para o canal segundo inclinação de -60° o padrão bolhas ocorre para valores de j_L inferiores a 0,2 m/s, e a partir de $j_L = 0,3$ m/s a transição para esta inclinação se diferencia das demais.

Figura 6.12 Comparação entre transições para canal horizontal e descendentes segundo método k-means.

A transição intermitente-anular é caracterizada pelo incremento drástico de j_G com o aumento de j_L para escoamento descendente enquanto para escoamento horizontal esta transição se verifica segundo valores de j_G que apresentam variações relativamente marginais. Destaca-se ainda nesta figura o fato da transição entre os padrões intermitente e anular ocorrer para velocidades superficiais da fase gás significativamente superiores para o escoamento horizontal em relação as orientações descendentes.

6.1.2. EFEITO ROTAÇÃO

Os resultados descritos no item anterior foram levantados para $\theta = 0^\circ$ em condições de escoamento horizontal, inclinado ascendente e descendente. Neste item, resultados para inclinações similares são apresentados considerando condições em que o canal encontra-se rotacionado segundo ângulos θ de 45° e 60° , em relação ao seu eixo longitudinal. A Fig. 6.13 apresenta o mapa de escoamento horizontal com $\theta = 45^\circ$. Esta figura apresenta imagens de escoamentos e as transições segundo o método k-means para escoamento horizontal e ângulos θ iguais a 0° e 45° . Observa-se estratificação das fases devido ao efeito da gravidade no escoamento, e a fase gás tende a se concentrar na região superior do canal.

Figura 6.13 Efeito da rotação axial segundo um ângulo $\theta = 45^\circ$ nos padrões de escoamento e nas transições entre eles para canal horizontal.

Ao comparar as figuras 6.1 e 6.13 verifica-se, com base no critério subjetivo de classificação de escoamentos, que para ângulo θ igual a 45° o padrão bolhas verifica-se a partir de velocidades superficiais da fase líquida superiores as velocidades observadas para ângulo θ igual a 0° . Comportamento similar verifica-se na Fig. 6.13 para a transição indicada pelo método de agrupamento de dados.

Com a rotação do canal o escoamento intermitente é favorecido, devido ao fato das bolhas discretas de gás nesta condição se concentrarem na região superior do canal para uma mesma área de seção transversal, aumentando probabilidade delas coalescer em pistões. A transição intermitente-anular desloca-se para valores de j_G superiores com a rotação do canal. No escoamento anular, o líquido que concentra-se na região inferior do canal apresenta ondulações em sua interface e bolhas de gás discretas, conforme ilustra a Fig. 6.13.

Figura 6.14 Escoamento anular em canal horizontal para $\theta = 45^\circ$. $j_G=11,47$ m/s e $j_L=0,3051$ m/s.

Para manter o padrão anular com canal rotacionado de 45° requer-se j_G superior em relação ao canal com $\theta = 0^\circ$ de forma que escoamentos secundários que permitem o surgimento de uma película de líquido ao longo do perímetro da seção supere efeitos gravitacionais em uma altura vertical efetiva superior conforme ilustrado na Fig. 6.14. Nesta figura observa-se uma espessura de filme superior na região inferior do canal em relação a espessura no topo do canal.

Como se ilustra na Fig. 6.15, a geometria do canal não muda com a rotação, mas as propriedades geométricas da seção variam, e também a distribuição das fases conforme se ilustrou nas Fig. 6.12 a Fig. 6.14. Nesta figura ilustra-se o fato de que embora a geometria do canal não se altere com a rotação, o comprimento entre seus pontos superior e inferior se elevam alterando a distribuição das fases conforme ilustrado nas Fig. 6.12 e 6.13.

Figura 6.15 Ilustração da variação da altura do escoamento com a rotação do canal.

Efeitos de estratificação também se verificam para canal rotacionado segundo um ângulo $\theta = 60^\circ$, no entanto para este valor de θ as transições não apresentam diferenças significativas em relação ao mapa elaborado segundo o critério k-means para $\theta = 0^\circ$ conforme ilustra a Fig. 6.16.

Figura 6.16 Efeito da rotação axial segundo um ângulo $\theta = 60^\circ$ nos padrões de escoamento e nas transições entre eles para canal horizontal.

Espera-se que com o incremento do ângulo θ sendo próximo de 90° , o efeito da rotação do canal nos padrões de escoamento e transições entre eles se aproxime da condição θ igual a 0° . Isto é corroborado pela Fig. 6.17 que compara as transições entre canais rotacionados.

Figura 6.17 Comparação entre transições caracterizadas segundo o método k-means para escoamento horizontal para distintos ângulos θ .

Segundo esta figura, as transições para $\theta = 0^\circ$ e igual a 60° são próximas quando comparados com $\theta = 45^\circ$. Espera-se também que, com o incremento da inclinação conforme o escoamento se aproxima da condição vertical, o efeito da rotação do canal nos padrões de escoamento torne-se desprezível.

A Fig. 6.18 ilustra os padrões de escoamento indicados por símbolos e as respectivas imagens para escoamento inclinado descendente segundo um ângulo de -30° para o canal rotacionado de 45° . Esta mesma figura inclui transições entre padrões de escoamento para a mesma inclinação e ângulos θ de 0° , 45° e 60° .

Para escoamento descendente a rotação proporciona uma região em que com aumento de j_G para j_L fixo ocorrem os padrões segundo a seguinte ordem intermitente – anular – intermitente. Tal comportamento não se verifica para escoamentos horizontais e ascendentes.

Figura 6.18 Efeito da rotação axial θ nos padrões de escoamento para um canal inclinado segundo ângulo de -30° para linhas (transições segundo k-means), símbolos e imagens correspondendo a $\theta=45^\circ$.

Neste caso, com a rotação do canal escoamento anular é favorecido de forma que líquido concentra-se na região inferior do canal, com efeitos de estratificação e apresentando uma interface com ondulações relacionadas com bolhas arrastadas no líquido, conforme ilustra a Fig. 6.19.

Figura 6.19 Escoamento anular em canal inclinado -30° para $\theta=45^\circ$. $j_G=0,6528$ m/s e $j_L=0,1953$ m/s.

Com acréscimos de j_G forma-se um pistão de líquido. Acréscimos ainda maiores provocam transição de intermitente para anular com efeitos relevantes do atrito na interface.

6.1.3. COMPARAÇÕES COM MÉTODOS DA LITERATURA

Este item apresenta comparações entre os resultados experimentais levantados neste estudo e os métodos de previsão de padrões de escoamento descritos no capítulo 3. A Fig. 6.20 ilustra comparações entre os mapas elaborados neste estudo para escoamentos horizontais e $\theta=0^\circ$ e os métodos de previsão propostos por Taitel e Dukler (1976), Felcar et al. (2007) e o mapa desenvolvido por Coleman e Garimella (1999) para um canal retangular de diâmetro hidráulico 5,36 mm e com fator de forma 0,75, utilizando critérios subjetivos com base em imagens capturadas com câmera de alta velocidade.

Figura 6.20 Comparação dos mapas de padrões para escoamento horizontal e $\theta=0^\circ$ levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.

Na Fig. 6.20 observa-se que os métodos de previsão não proporcionam previsões satisfatórias da transição entre os padrões bolhas e intermitente. Em relação à transição intermitente anular segundo a linha determinada pelo método k-means, o método de Taitel e Dukler (1976) e a linha proposta por Coleman e Garimella (1999) não capturaram adequadamente a esta transição.

A Fig. 6.21 ilustra os mapas para canal vertical com escoamento ascendente obtidos no presente estudo e as transições previstas pelos métodos de Taitel et al. (1980), Hibiki e Mishima (2001) e as transições segundo o mapa de escoamento proposto por Mishima et al. (1993) desenvolvido para uma seção retangular com área transversal de $2,4 \times 40 \text{ mm}^2$. Observa-se que o mapa de Mishima et al. (1993) captura satisfatoriamente as transições caracterizadas através de visualizações.

Figura 6.21 Comparação dos mapas de padrões para escoamento vertical ascendente levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.

Vale destacar que o mapa proposto por Mishima et al. (1993) foi desenvolvido para escoamento ascendente de misturas água/ar em canal com diâmetro hidráulico de 4,53 mm, classificados segundo critérios subjetivos com base na análise de imagens do escoamento.

A transição intermitente- anular obtida experimentalmente não é capturada satisfatoriamente pelos métodos de Taitel et al. (1980) e Hibiki e Mishima (2001). Observa-se que desvios em relação a transição experimental incrementam-se conforme aumenta o valor de j_L .

Em relação a transição intermitente-anular, se constata que os métodos de Taitel et al. (1980) e Hibiki e Mishima (2001) proporcionam uma transição segundo um valor constante de j_G superior ao observado na Fig. 6.20 segundo métodos subjetivos e objetivos.

Para canal inclinado segundo ângulos de 60° e escoamento ascendente, conforme se ilustra na Fig. 6.22 o método de Taitel et al. (1980) implementado para este ângulo captura adequadamente a transição bolhas-intermitente. Tal resultado parece indicar que para esta inclinação a transição ocorre segundo uma densidade máxima de bolhas correspondendo a uma fração de vazio superficial igual a 0,52, conforme proposto pelos autores.

Figura 6.22 Comparação dos mapas de padrões para escoamento inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta=0^\circ$ levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.

Isto permite concluir que os mecanismos responsáveis por esta transição para escoamento vertical e segundo inclinação de 60° são distintos. Conforme proposto por Barnea e Taitel (1986), para escoamento vertical os mecanismos responsáveis da transição são: (i) densidade máxima de bolhas dispersas correspondendo a fração de vazio superficial constante igual a 0,25, (ii) rompimento de bolhas maiores por efeitos de turbulência, e (iii) concentração máxima de bolhas com fração de vazio superficial constante e igual a 0,52. Já para escoamento inclinado segundo ângulo de 60° o mecanismo responsável é apenas o (iii).

Para escoamento inclinado segundo 60° , as linhas de transição propostas por Mishima et al. (1993) ainda são próximas da transição bolhas-intermitente caracterizada pelo método k-means. Em relação a transição intermitente anular, a transição proposta por Mishima et al. (1993) não captura adequadamente transição observada experimentalmente.

A Fig. 6.23 ilustra comparações entre resultados do presente estudo para canal inclinado segundo ângulos de 30° e transições segundo os métodos de Taitel et al. (1980) e o mapa de Mishima et al. (1993). Observa-se nesta figura que os métodos preveem satisfatoriamente a transição bolhas-intermitente para velocidades superficiais da fase elevadas.

Figura 6.23 Comparação dos mapas de padrões para escoamento inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta=0^\circ$ levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.

Observa-se também que o método de Hibiki e Mishima (2001) não captura adequadamente a transição obtida a partir de resultados experimentais entre padrões bolha e intermitente.

Em relação à transição intermitente anular, observa-se que a transição segundo o método k-means não é adequadamente capturada pelos métodos de previsão.

A Fig. 6.24 apresenta uma comparação do método de previsão de Barnea et al. (1982) com os mapas de escoamento vertical descendente propostos no presente estudo.

Figura 6.24 Comparação dos mapas de padrões para escoamento vertical descendente levantados no presente estudo e métodos de previsão da literatura.

As transições bolha-intermitente segundo o método k-means e baseada nas visualizações são próximas às fornecidas pelo método de Barnea et al. (1982). Já para a transição intermitente-anular o método de Barnea et al. (1982) falha em prever tanto as tendências como os resultados. Este método, prevê a valores aproximadamente constantes de j_L para a transição intermitente-anular. Observa-se na Fig. (6.24) que escoamento anular foi identificado para valores de j_L inferiores aos previstos.

Nas Tabs. 6.1 e 6.2 apresenta-se uma comparação entre as previsões proporcionadas pelos métodos e os padrões de escoamento classificados segundo o o método k-mens e visualizações para escoamento horizontal. Nestas tabelas indica-se a percentagem de padrões previstos corretamente segundo métodos da literatura. Vale ressaltar que escoamentos denominados de intermediários segundo a classificação baseada em visualizações foram incluídos no grupo de escoamento intermitentes, visando comparar com os métodos de previsão.

Tabela 6.1 Avaliação dos métodos de previsão de padrões de escoamento para canal horizontal com classificação baseado no método k-means.

Configuração Escoamento	Taitel e Dukler (1976)			Felcar et al. (2007)		
	Bolhas [%]	Interm. [%]	Anular [%]	Bolhas [%]	Interm. [%]	Anular [%]
$\phi = 0^\circ / \theta = 0^\circ$	0	98,0	70,6	0	100	20,6
$\phi = 0^\circ / \theta = 45^\circ$	0	96,7	54,1	0	100	13,5
$\phi = 0^\circ / \theta = 60^\circ$	0	97,9	9,4	0	100	4,2

Tabela 6.2 Avaliação dos métodos de previsão de padrões de escoamento para canal horizontal com classificação baseado em visualizações.

Configuração Escoamento	Taitel e Dukler (1976)			Felcar et al. (2007)		
	Bolhas [%]	Interm. [%]	Anular [%]	Bolhas [%]	Interm. [%]	Anular [%]
$\phi = 0^\circ / \theta = 0^\circ$	0	96,7	45,7	0	100	15,2
$\phi = 0^\circ / \theta = 45^\circ$	0	94,8	46,9	0	100	15,6
$\phi = 0^\circ / \theta = 60^\circ$	0	97,6	65,5	0	100	31

Observa-se destas tabelas que os métodos não proporcionaram previsões adequadas em relação a padrão anular e bolhas. Observa-se também que o método de Taitel e Dukler (1976) proporcionou as melhores previsões.

De forma análoga a canal horizontal, as Tabs. 6.3 e 6.4 apresentam comparações entre os métodos de previsão para canais inclinados e padrões de escoamento classificados neste estudo utilizando a técnica de agrupamento de dados k-means e visualmente.

Tabela 6.3 Avaliação dos métodos de previsão de padrões de escoamento para canais inclinados com classificação baseada no método k-means.

Configuração Escoamento	Taitel et al. (1980)			Hibiki e Mishima (2001)		
	Bolhas	Interm.	Anular	Bolhas	Interm.	Anular
$\phi = 90^\circ$	52,9	99,5	12,8	32,9	100	12,8
$\phi = 60^\circ / \theta = 0^\circ$	89,8	97,3	13,5	29,5	100	5,4
$\phi = 60^\circ / \theta = 45^\circ$	84,8	98,4	11,9	27,2	100	4,8
$\phi = 60^\circ / \theta = 60^\circ$	88,9	98,9	17,1	26,7	100	4,9
$\phi = 30^\circ / \theta = 0^\circ$	83,2	98,8	29,0	22,1	100	0
$\phi = 30^\circ / \theta = 45^\circ$	86,0	100	34,3	23,7	100	14,3
$\phi = 30^\circ / \theta = 65^\circ$	88,5	98,7	29,4	26,4	100	8,8

Tabela 6.4 Avaliação dos métodos de previsão de padrões de escoamento para canais inclinados com classificação baseada em visualizações.

Configuração Escoamento	Taitel et al. (1980)			Hibiki e Mishima (2001)		
	Bolhas	Interm.	Anular	Bolhas	Interm.	Anular
$\phi = 90^\circ$	69,1	100	11,1	41,8	100	11,1
$\phi = 60^\circ / \theta = 0^\circ$	93,9	96,2	12,5	31,7	100	5,0
$\phi = 60^\circ / \theta = 45^\circ$	93,5	89,4	11,9	40,3	100	4,8
$\phi = 60^\circ / \theta = 60^\circ$	95,7	92,2	16,7	34,8	100	4,8
$\phi = 30^\circ / \theta = 0^\circ$	83,8	92,2	23,7	26,3	100	0
$\phi = 30^\circ / \theta = 45^\circ$	94,5	94,4	34,3	30,1	100	14,3
$\phi = 30^\circ / \theta = 65^\circ$	96,2	96,9	33,3	29,5	100	10,0

Observa-se das Tab. 6.3 e 6.4 que o método de Taitel et al. (1980) proporcionou melhor previsão dos resultados. As Tabs. 6.5 e 6.6 apresentam a avaliação do método de Barnea et al. (1982) para escoamentos descendentes.

Tabela 6.5 Avaliação do método de Barnea et al. (1982) na previsão de padrões de escoamentos descendentes com classificação baseada no método k-means.

Configuração Escoamento	Bolhas	Intermitente	Anular
$\phi = -90^\circ$	65,5	57,7	64,7
$\phi = -60^\circ / \theta = 0^\circ$	50,0	45,0	56,1
$\phi = -30^\circ / \theta = 0^\circ$	65,9	51,6	65,9
$\phi = -30^\circ / \theta = 45^\circ$	62,3	50,3	65,9
$\phi = -30^\circ / \theta = 60^\circ$	59,3	50,4	65,6

Tabela 6.6 Avaliação do método de Barnea et al. (1982) na previsão de padrões de escoamentos descendentes com classificação baseada em visualizações..

Configuração Escoamento	Bolhas	Intermitente	Anular
$\phi = -90^\circ$	71,7	57,2	66,7
$\phi = -60^\circ / \theta = 0^\circ$	75,0	53,4	61,1
$\phi = -30^\circ / \theta = 0^\circ$	75,0	49,2	63,4
$\phi = -30^\circ / \theta = 45^\circ$	75,6	53,7	70,9
$\phi = -30^\circ / \theta = 60^\circ$	82,1	52,6	67,1

Observa-se destas tabelas que o método não captura adequadamente a previsão do padrão intermitente, apresentando previsões inferiores ao 60%. Também, este método não proporciona previsões adequadas para as outras transições.

6.2. FRAÇÃO DE VAZIO

Este item apresenta resultados para fração de vazio levantados neste estudo segundo as técnicas descritas no item 5.3. Também são apresentados resultados para velocidades da bolha da bolha alongada e comparações entre os resultados experimentais para fração superficial e as correspondentes previsões segundo os métodos existentes na literatura utilizados neste estudo para a previsão da parcela de perda de pressão gravitacional.

6.2.1. ESTIMATIVAS SEGUNDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS

A Tab. 6.7 apresenta resultados da fração de vazio segundo escoamento em bolhas para distintas inclinações do canal e diferentes ângulos θ .

Tabela 6.7 Comparação entre valores de fração de vazio superficial e volumétrica levantados experimentalmente e diferenças em relação as previsões através de métodos da literatura.

Posicionamento	α	α_3	j_G [m/s]	j_L [m/s]	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)
Horizontal / $\theta = 0^\circ$	0,105	0,084	0,1283	0,1953	-57,95	30,84
	0,134	0,086	0,1802	0,2504	-65,73	28,11
	0,115	0,065	0,1858	0,3051	-90,12	14,79
Horizontal / $\theta = 45^\circ$	0,040	0,038	0,1858	0,3051	-225,2	-45,76
Horizontal / $\theta = 60^\circ$	0,031	0,052	0,2195	0,3051	-174,6	-19,23
	0,048	0,043	0,1793	0,1953	-305,3	-69,51
Ascendente 30° / $\theta = 0^\circ$	0,188	0,157	0,2133	0,0906	-125,9	14,13
	0,118	0,113	0,1772	0,0906	-177,5	-6,232
Ascendente 30° / $\theta = 45^\circ$	0,034	0,065	0,2229	0,1953	-225,8	-30,2
	0,060	0,044	0,2229	0,1953	-381,3	-92,33
Ascendente 60° / $\theta = 0^\circ$	0,069	0,132	0,1735	0,1953	-31,27	45,32
	0,044	0,094	0,2127	0,1953	-35,5	44,78
Ascendente 90°	0,099	0,162	0,1758	0,2504	12,79	62,13
	0,078	0,138	0,2215	0,2504	-24,68	47,99
Descendente 90°	0,164	0,148	0,1761	0,2504	-6,461	53,51
	0,122	0,128	0,1738	0,3051	21,92	64,38
Descendente 60°	0,116	0,154	0,1778	0,2504	13,57	61,95
Descendente 30° / $\theta = 0^\circ$	0,083	0,145	0,22	0,3051	0,6486	56,87
Descendente 30° / $\theta = 45^\circ$	0,040	0,028	0,1793	0,3051	-326,8	-94,25
Descendente 30° / $\theta = 60^\circ$	0,032	0,065	0,179	0,2504	-118,3	4,842

Analisou-se 20 condições experimentais, sendo as imagens dos escoamentos para estas condições que permitiram calcular a fração de vazio por tratamento de imagens.

Na Tab. 6.7 também indica-se o desvio médio em relação aos métodos de previsão de Turner e Wallis (1965) e Thom (1964). Os métodos de Wallis (1969), Hibiki e Ishii (2003), Cai et al. (1997), Permoli et al. (1971), Spedding e Chen (1984) e Zhao et al. (2000), também foram comparados a estes resultados, no entanto não constam na Tab. 6.1 pois apresentaram desvios superiores aos verificados para os métodos de Turner e Wallis (1965) e Thom (1964).

De forma geral, o método de Thom (1964) prevê valores superiores aos os resultados obtidos por processamento de imagens (desvios negativos), e o método de Turner e Wallis (1965) prediz resultados inferiores (desvios positivos). Na Fig. 6.25 ilustra-se uma comparação entre α_3 e α para diferentes inclinações do canal.

Figura 6.25 Resultados de α_3 em função de α obtidos por processamento de imagens.

Nesta figura observa-se uma relação com tendência linear para valores da fração de vazio superficial e volumétrica inferiores que 0,2. Utilizando o mesmo procedimento, foram analisadas as variações temporais da fração de vazio superficial para escoamento ascendente com $j_G = 0,1758$ m/s e $j_L = 0,2504$ m/s. Para este escoamento, analisou-se uma região do canal de comprimento $L = 17$ mm. Nesta região, a fração de vazio superficial foi determinada para 6 imagens consecutivas capturadas cada 0,004 segundos. Na Fig. 6.26 é ilustrada a fração de vazio determinada em regiões consecutivas ao longo do escoamento, onde x é o comprimento na direção do eixo longitudinal e L é o comprimento total da região de análise de 17 mm.

Figura 6.26 Variação da fração de vazio superficial com o tempo ao longo de uma região de 17 mm de comprimento no escoamento ascendente com $j_G = 0,1758$ m/s e $j_L = 0,2504$ m/s.

Apresentase na Fig. 6.26 apenas as frações de vazio determinada para tempos $t=0$ s, $t=0,004$ s e $t=0,009$ s. A Fig. 6.27 apresenta as flutuações temporais da fração de vazio superficial para a mesma região de comprimento de 17 mm e escoamento com $j_G = 0,1758$ m/s e $j_L = 0,2504$ m/s. Neste caso, considerou-se 0,03 s para avaliar as flutuações da fração de vazio superficial.

Figura 6.27 Variação temporal da fração de vazio superficial em regiões fixas do escoamento $x/L=16,13\%$, $x/L=32,26\%$ e $x/L=48,39\%$.

A Fig. 6.27 apresenta resultados apenas para três regiões fixas, caracterizadas por $x/L=16,13\%$, $x/L=32,26\%$ e $x/L=48,39\%$. A partir dos resultados de fração de vazio superficial desenvolvidos a partir de processamento de imagens do escoamento ascendente com $j_G = 0,1758$ m/s e $j_L = 0,2504$ m/s, e apresentados nas Fig. 6.26 e 6.27, obteve-se uma média temporal e espacial da fração superficial igual a 3,96%, valor inferior ao obtido previamente na Tab. 6.7.

6.2.2. ESTIMATIVAS BASEADAS NA VELOCIDADE DE BOLHAS ALONGADA

Mediu-se a velocidade da bolha alongada mediante correlação cruzada entre dois sinais de laser atenuados pelo escoamento conforme descrito no item 5.2. Estes resultados permitiram comparar a velocidade da bolha alongada para velocidades superficiais da fase gás entre 0,5 e 2 m/s, para diferentes inclinações do canal e ângulos θ . A Fig. 6.28 ilustra a velocidade da bolha medida para canal horizontal segundo ângulos θ igual a 0° , 45° e 60° .

Figura 6.28 Velocidade da bolha alongada para canal horizontal.

Observa-se que a velocidade da bolha não é influenciada significativamente pelo ângulo θ , resultado em valores e tendências similares independentemente do ângulo θ . A Tab.6.8 apresenta os resultados dos parâmetros de distribuição obtidos para as diferentes inclinações.

Tabela 6.8 Parâmetros do “drift flux model” obtidos por regressão linear.

Inclinação do canal	C_0	$\overline{u_{GJ}}$
Horizontal 0°	0,63	0,15
Ascendente 30°	0,56	0,22
Ascendente 60°	0,6	0,2
Ascendente 90°	0,51	0,3
Descendente 90°	0,58	0,06
Descendente 60°	0,61	-0,01
Descendente 30°	0,8	-0,4

O coeficiente de distribuição resultou em valor inferior a 1. Para canal posicionado horizontalmente e inclinados, neste caso para escoamento ascendente, a velocidade das bolhas alongadas não apresentou diferenças significativas, resultando em um coeficiente de distribuição de fases próximo a 0,6, e a velocidade média de deslizamento ponderada da fase gás próxima a 0,2.

Constatou-se que para canal horizontal e inclinado, a velocidade da bolha foi superior em escoamentos ascendentes que em descendentes. Para ângulos de inclinação $\phi < 0$, estes escoamentos apresentaram valores de $\overline{u_{GJ}}$ próximos a 0. A Fig. 6.29 ilustra uma os resultados de fração de vazio superficial obtidos a partir utilização dos coeficientes $\overline{u_{GJ}}$ e C_0 no drift flux, os que são comparados com previsões proporcionadas por métodos da literatura.

Figura 6.29 Comparação de resultados experimentais com métodos de previsão da literatura para $j_L = 0,4$ m/s.

Também, se inclui na Fig. 6.29 três estimativas da fração de vazio para escoamentos segundo bolhas em canal horizontal. As estimativas foram obtidas a partir do processamento de imagens, e observa-se que apresentam valores próximos dos proporcionados pelos métodos de previsão do Thom (1964) e Turner e Wallis (1965). Vale ressaltar que os resultados estes resultados foram desenvolvidos para velocidades superficiais da fase líquida inferiores a $j_L = 0,4$ m/s.

As estimativas de fração de vazio baseadas na determinação dos coeficientes através do ajuste segundo o “drift flux model” apresentou valores superiores aos proporcionados pelos métodos de previsão da literatura inclusive ao modelo homogêneo. Aplicou-se o método apenas para faixa de j_G entre 0,2 e 0,6 m/s, condições para as quais os coeficientes foram ajustados. Observa-se da Fig. 6.29 que a estimativa da fração de vazio é superestimada através do método apresentado neste estudo. Vale ressaltar que foram comparadas velocidades para 3 bolhas alongadas considerando sua região posterior e frontal. Os resultados indicaram que a região posterior da bolha desloca com velocidade mais elevada, sendo 10 a 15% superior em relação da velocidade obtida para a região frontal da bolha alongada. Assim, com base nos resultados insatisfatórios obtidos através do ajuste segundo o “drift flux” e na fração reduzida de dados correspondentes ao padrão bolhas, a análise da parcela da perda de pressão devido a efeitos gravitacionais foi realizada considerando métodos da literatura para a previsão da fração de vazio superficial.

6.3. PERDA DE PRESSÃO

Neste item são apresentados resultados experimentais de perda de pressão durante escoamentos bifásicos obtidos na da seção de teste retangular descrita no item 4.3. Com base no procedimento experimental e de redução de dados apresentados nos itens 5.2 e 5.3 foram levantados 4638 resultados experimentais. Os ensaios foram desenvolvidos para velocidades mássicas entre 90,4 e 762 kg/m²s e frações mássicas de gás entre 0,007 e 2,24%. O efeito da inclinação do canal na perda de pressão foi avaliado para ângulos de inclinação entre -90° e 90°. Também se avaliou o efeito da rotação da seção de testes em torno de seu eixo axial segundo ângulos θ de 45° e 60° na perda de pressão. O ângulo θ foi medido a partir da condição das faces superior e inferior do canal posicionadas horizontalmente.

6.3.1. PERDA DE PRESSÃO EM CANAL HORIZONTAL

Conforme descrito no procedimento de redução de dados, a parcela de perda de pressão aceleracional é desprezível, desta forma os resultados diretamente medidos para canais posicionados horizontalmente atribui-se à perda de pressão por atrito. A Fig. 6.30 ilustra a variação do gradiente de pressão obtido com a variação da velocidade superficial da fase gás para $j_L=0,195$ m/s.

Figura 6.30 Variação do gradiente de pressão com j_G para canal horizontal e G próximo de 200 kg/m²s.

Nesta figura são indicados os padrões de escoamentos segundo a classificação através do algoritmo k-means. Adotou-se neste item símbolos quadrados representar o padrão em bolhas e círculos para padrão intermitente.

Observa-se na Fig. 6.30 para valores de j_G inferiores aos da transição bolhas-intermitente, que o gradiente de pressão decresce com aumentos progressivos de j_G . Para valores de j_G superiores a aproximadamente 0,25 m/s constata-se gradientes de pressão aproximadamente constantes com o aumento de j_G , e posteriormente o gradiente de pressão se eleva com acréscimos adicionais da velocidade superficial da fase gás. Para velocidades mássicas superiores, conforme ilustra a Fig. 6.31, verifica-se que o comportamento do gradiente de pressão é similar ao observado para G próximo de 200 kg/m²s na região de transição bolha- intermitente. Também se observa, conforme esperado, que em velocidades da fase gás superiores, o gradiente de pressão se eleva com aumento de j_G .

Figura 6.31 Gradiente de pressão em canal horizontal para G próximo a $420 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Constata-se a partir da Fig. 6.31 ao contrario da Fig. 6.30 para velocidade mássica inferior, o padrão bolhas, o gradiente de pressão se eleva com o aumento de j_G até a região de transição para intermitente, na qual o gradiente apresenta uma redução marginal com aumentos de j_G , até que para valores de j_G superiores a 1 m/s o gradiente de pressão se eleva com acréscimos progressivos de j_G . A Fig. 6.31 inclui resultados experimentais para escoamentos segundo padrão anular, os que são representados por símbolos de triângulos, o que será adotado para todo o item 6.3. A Fig. 6.32 ilustra os resultados experimentais obtidos para o canal posicionado horizontal, indicando as transições entre padrões caracterizadas através do algoritmo k-means. Nesta figura constata-se que na região de transição o gradiente de pressão apresenta uma inflexão no seu comportamento independentemente da velocidade mássica avaliada.

Figura 6.32 Gradientes de pressão em canal horizontal para j_L entre 0,09 e 0,76 m/s.

Observa-se também na Fig. 6.32 que as curvas correspondentes aos valores inferiores de j_L não apresentam alterações significativas de comportamento pois incluem apenas resultados levantados para o padrão intermitente.

6.3.2. EFEITO DA ROTAÇÃO DO CANAL θ PARA ESCOAMENTOS HORIZONTAIS

As Figs. 6.33 a 6.37 ilustram o efeito do ângulo θ na perda de pressão para escoamentos horizontais. Segundo a Fig. 6.33 diferenças entre os gradientes de pressão para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 45^\circ$ são

desprezíveis no caso de j_G superiores a aproximadamente 0,2 m/s. Entretanto para velocidades superficiais inferiores diferenças significativas se verificam. Tal comportamento está relacionado as diferenças entre padrões de escoamento no caso de $j_G < 0,2$ m/s.

Figura 6.33 Gradientes de pressão para ângulos θ igual a 0° e 45° com G próximo de 200 kg/m²s (símbolos preenchidos $\theta = 0^\circ$, símbolos vazados $\theta = 45^\circ$).

A Fig. 6.34 ilustra resultados para a seção de teste posicionada segundo ângulos θ de 0° e 60° . De forma análoga a Fig. 6.33 diferenças significativas no gradiente de pressão para j_G inferiores a 0,2 m/s também são observadas na Fig. 6.34, sendo que nesta região o gradiente de pressão para $\theta = 60^\circ$ é superior.

Figura 6.34 Gradientes de pressão para ângulos θ igual a 0° e 60° com G próximo de 200 kg/m²s.

Vale ressaltar que, neste caso, a comparação entre gradientes de pressão se deu considerando padrões de escoamentos similares. No caso de valores de j_G superiores a 0,2 m/s os gradientes de pressão avaliados para $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 60^\circ$ apresentam tendências similares entretanto os resultados para esta última condição são consistentemente superiores. Vale destacar que ambas condições avaliadas envolvem a mesma seção de teste e conseqüentemente mesmos diâmetros hidráulicos e equivalente. Assim é possível indicar que a utilização destas dimensões características em escoamentos bifásicos devem ser aplicadas com cautela, pois distribuições de fases distintas podem afetar também o resultado.

Figura 6.35 Gradientes de pressão para ângulos θ igual a 0° e 60° com G entre 250 e 315 kg/m².

Figura 6.36 Gradientes de pressão para ângulos θ igual a 0° e 60° com G entre 360 e 430 kg/m².

Nas Figs. 6.35 e 6.36 nota-se que com o incremento de G , e consequentemente, gradientes de pressão superiores, o efeito do ângulo θ no gradiente de pressão torna-se gradualmente desprezível, não verificando-se diferenças significativas em relação a $\theta = 0^\circ$ para valores de G superiores a 360 kg/m^2 .

A Fig. 6.37 apresenta uma comparação entre os gradientes de pressão obtidos para velocidade mássica próxima a 600 kg/m^2 , com os canais posicionados segundo ângulos θ iguais a 0° , 45° e 60° .

Figura 6.37 Efeito do ângulo θ no gradiente de pressão para G próximo de 600 kg/m^2 e escoamento horizontal.

De forma análoga aos resultados obtidos para G igual a 360 kg/m^2 ilustrado na Fig. 6.36, os efeitos do ângulo θ são desprezíveis para G igual a 600 kg/m^2 na maioria das condições avaliadas. Entretanto observa-se que os gradientes de pressão apresentam tendências distintas de acordo com o ângulo θ na região compreendida por valores de j_G entre 0,3 e 0,5 m/s. Tal região corresponde a transição entre padrões bolha e intermitente.

6.3.3. PERDA DE PRESSÃO EM CANAIS INCLINADOS

A Fig. 6.38 ilustra resultados do gradiente de pressão obtido para a seção de teste inclinada segundo ângulos ϕ em relação ao plano horizontal superiores a 0° e com suas faces superior e inferior

paralelas ao plano horizontal ($\theta = 0^\circ$). Inclui-se também nesta figura a fração de vazio superficial proporcionada pelo modelo homogêneo.

Figura 6.38 Efeito do $\phi \geq 0^\circ$ no gradiente de pressão total para G próximo de $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Conforme discutido no item 6.1.1 a inclinação do canal influencia o padrão de escoamento. Assim, imagens do escoamento foram incluídas na Fig. 6.38, sendo estas imagens obtidas para valores de j_G próximos de $0,17 \text{ m/s}$, condição na qual os gradientes de pressão obtidos foram significativamente superiores aos observados para canal horizontal. Nestas imagens constatam-se que a distribuição de fases no escoamento apresenta características particulares conforme a inclinação do canal.

Segundo indicado por Woldesemayat e Ghajar (2007) a fração de vazio superficial, para j_G e j_L fixos, diminui com o acréscimo de ϕ . A fração de vazio superficial α relaciona-se com a perda de pressão conforme a seguinte equação, descrita no procedimento de redução de dados no item 5.3:

$$\Delta P_{TOTAL} = \Delta P_{ATRITO} + [\alpha \cdot \rho_G + (1 - \alpha) \rho_L] \cdot g \cdot \sin \phi \quad (6.1)$$

Nesta equação a parcela aceleracional de perda de pressão foi considerada desprezível, sendo o gradiente de pressão total dado pela soma das parcelas gravitacional e de atrito.

Segundo a Eq. (6.1), a parcela gravitacional decresce com incremento de α a qual se eleva com o incremento j_G , conforme ilustrado na Fig. 6.38. Assim, o decréscimo de Δp_{GRAV} com o aumento de α justifica a redução do Δp_{TOTAL} com o aumento de j_G . Também, constata-se que com o incremento de j_G e a redução da parcela devido a efeitos gravitacionais o efeito de ϕ sobre a perda de pressão total decrescem progressivamente.

Na Tab. 6.4 são apresentadas estimativas da fração de vazio a partir do modelo homogêneo para valores de j_G superiores a 1 m/s, visando observar as tendências das parcelas de pressão gravitacional e por atrito.

Tabela 6.9 Estimativa das parcela gravitacionais e de atrito segundo o método homogêneo.

Inclinação do Canal	j_G [m/s]	Δp_{ATRITO} [kPa/m]	Δp_{GRAV} [kPa/m]	α [-]	Δp_{GRAV} [%]
Horizontal	1,128	0,8798	0	0,8525	0
	1,236	0,9725	0	0,8636	0
	1,406	1,032	0	0,878	0
	1,732	1,065	0	0,8986	0
	1,93	1,16	0	0,9081	0
	2,125	1,222	0	0,9158	0
	2,502	1,327	0	0,9276	0
30°	1,09	2,073	0,7486	0,8481	26,53
	1,299	2,186	0,645	0,8693	22,78
	1,58	2,125	0,5434	0,89	20,36
60°	1,073	2,052	1,314	0,846	39,04
	1,279	2,166	1,131	0,8675	34,30
90°	1,099	2,336	1,487	0,8491	38,90
	1,305	2,423	1,284	0,8698	34,64

Segundo esta tabela, em canais inclinados a parcela gravitacional diminui porcentualmente conforme aumenta j_G , diferente da parcela por atrito. Também, para os resultados avaliados, observa-se que a perda de pressão por atrito em canal vertical é superior da obtida para canais inclinados, sendo os gradientes destes canais similares. Na Fig. 6.39 ilustram-se os resultados dos gradientes de pressão por atrito, sendo estes obtidos a partir da estimativa de fração de vazio superficial segundo o método homogêneo.

Figura 6.39 Gradientes de pressão por atrito estimados a partir da estimativa de fração de vazio superficial segundo o método homogêneo.

Outros métodos de estimativa de fração de vazio, sendo sua previsão inferior ao método homogêneo, proporcionaram valores superiores da parcela de pressão gravitacional, e consequentemente proporcionaram valores inferiores de perda de pressão por atrito.

A Fig. 6.40 ilustra resultados do gradiente de pressão obtido para a seção de teste inclinada segundo ângulos $\phi \leq 0^\circ$.

Figura 6.40 Efeito do $\phi \leq 0^\circ$ no gradiente de pressão total para G próximo de $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

De forma análoga que a Fig. 6.38 são incluídas imagens do escoamento. Observam-se alterações nas tendências do gradiente de pressão, sendo estas relacionadas com a transição entre padrões. Assim, para canal inclinado -90° e -60° na região de transição entre padrão bolha e intermitente, ocorrendo para valores de j_G entre 0,2 e 0,3 m/s, o gradiente sofre um aumento brusco.

Já para canal inclinado -30° e horizontal, o gradiente de pressão apresenta uma curva sem alterações abruptas na região de transição bolha intermitente. Na região de escoamento anular para canais com $\phi < 0^\circ$, o gradiente de pressão apresenta um valor aproximadamente constante conforme aumenta progressivamente o valor de j_G ,

Efeito da velocidade mássica no gradiente de pressão

Escoamento Ascendente

As Figs. 6.41 a 6.43 ilustram o efeito da velocidade superficial da fase líquida na perda de pressão total com a variação da velocidade superficial do gás. A Fig. 6.41 ilustra os resultados para canal inclinado segundo um ângulo de 30° e $\theta = 0^\circ$. Observa-se que para j_L reduzidos, a perda de pressão inicialmente decresce com o aumento progressivo de j_G , atingindo um valor mínimo, a partir do qual Δp_{TOTAL} se eleva com incrementos adicionais de j_G . Tal comportamento se altera progressivamente com o incremento de j_L , até que para valores de velocidades superficiais superiores a 0,653 m/s, Δp_{TOTAL} apresenta apenas a tendência de incremento com a elevação de j_G .

Figura 6.41 Gradientes de pressão para canal inclinado $\phi = 30^\circ$ para j_L entre 0,09 e 0,76 m/s.

Observa-se a partir desta figura que as diferenças de Δp_{TOTAL} entre os escoamentos para $\phi = 0^\circ$ decrescem com o incremento de j_G . Tal comportamento decorre da redução relativa da perda de pressão devido a efeitos gravitacionais com o decréscimo da parcela de gás no escoamento.

Figura 6.42 Gradientes de pressão para canal horizontal e inclinado $\phi = 30^\circ$.

As Figs. 6.43 e 6.44 ilustram os gradientes de pressão para distintos valores de j_L obtidos para o canal segundo inclinação de 60° e escoamento vertical ascendente, respectivamente.

Figura 6.43 Gradientes de pressão para $\phi = 60^\circ$ e $\theta = 0^\circ$.

Figura 6.44 Gradientes de pressão para $\phi = 90^\circ$.

Observa-se nestas figuras que os gradientes de pressão apresentam tendências similares as indicadas na Fig. 6.41 para canal inclinado segundo ângulo de 30° . A perda de pressão apresenta condições em que decresce com acréscimos progressivos de j_G , atingindo um valor mínimo, a partir do qual o gradiente aumenta com acréscimos adicionais de j_G . A comparação das Figs. 6.41 a 6.44 permite também concluir que tal comportamento se intensifica com o incremento da inclinação.

Escoamento Descendente

As Fig. 6.45, 6.47 e 6.48 apresentam resultados para escoamentos descendentes inclinados. A Fig. 6.45 ilustra os resultados obtidos para escoamento descendente vertical. Nela constata-se tendências distintas das ilustradas na Fig. 6.44 para $\phi = 90^\circ$. Destaca-se ainda na Fig. 6.45 o fato das curvas para j_L reduzidos e elevados interceptarem-se para j_G próximo a 3 m/s.

Tal comportamento é explicado através da Fig. 6.46, a qual apresenta estimativas da diferença de pressão devido a efeitos gravitacionais baseada em distintas correlações para previsão da fração de vazio superficial. Nela constata-se o aumento do $|\Delta p_{\text{GRAV}}|$ com o aumento de j_L , e seu decréscimo com o aumento de j_G . É fato que a pressão devido a efeitos gravitacionais se eleva no sentido do escoamento para fluxos verticais descendentes. No caso da perda de pressão devido a efeitos de atrito esta se eleva com o incremento tanto de j_L quanto de j_G e seu efeito é responsável pelo decréscimo da pressão no sentido do escoamento. Assim, para valores reduzidos de j_G efeitos gravitacionais preponderam e Δp_{TOTAL} inferiores se verificam para j_L superiores. Por outro lado para valores

elevados de j_G , efeitos por atrito se tornam relevantes e Δp_{TOTAL} superiores são verificados para j_L superiores justificando as intersecções entre as curvas.

Figura 6.45 Gradientes de perda de pressão para $\phi = -90^\circ$.

Figura 6.46 Gradientes de perda de pressão gravitacional para $\phi = -90^\circ$.

Uma análise das Figs. 6.45, 6.47 e 6.48 revela, conforme esperado, a redução do $|\Delta p_{TOTAL}|$ para valores de j_G reduzidos. Com o decréscimo da inclinação do canal de forma análoga ao observado na Fig. 6.45, nas Fig. 6.47 e 6.48 observa-se o cruzamento das curvas de Δp_{TOTAL} vs. j_G para distintos j_L devido a variação relativa das componentes gravitacional e de atrito da perda de pressão com a variação da velocidade superficial da fase gás.

Figura 6.47 Gradientes de perda de pressão para $\phi = -60^\circ$.

Figura 6.48 Gradientes de perda de pressão para $\phi = -30^\circ$.

6.3.4. EFEITO DA ROTAÇÃO PARA ESCOAMENTOS INCLINADO

As Fig. 6.49 apresenta resultados para Δp_{TOTAL} obtidos para canal horizontal e canais inclinados segundo ângulos de -30° e 30° . As Figs. 6.50 e 6.51 ilustram o efeito da rotação do canal com variação de j_G para distintas inclinações da seção de testes.

Figura 6.49 Efeito do ângulo θ nos gradientes de pressão de canais inclinados com G próximo a $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

Conforme ilustrado através da Fig. 6.50, o ângulo de rotação afeta significativamente o gradiente total para valores de j_G reduzidos independentemente da inclinação do canal. Entretanto tais efeitos apresentam menor intensidade para escoamentos horizontais. Com o incremento de j_G o efeito da rotação do canal torna-se desprezível e os resultados para Δp_{TOTAL} estão dentro da faixa de incertezas independentemente do θ . De forma análoga que em canal horizontal para velocidades mássicas superiores a $360 \text{ kg/m}^2\text{s}$ constataram-se influência apenas marginal de θ em Δp_{TOTAL} conforme ilustrado na Fig. 6.50.

Figura 6.50 Efeito do ângulo θ nos gradientes de pressão de canais inclinados com G próximo de $400 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

A Fig. 6.51 ilustra o efeito da rotação da seção de testes no Δp_{TOTAL} para inclinações de 60° e horizontal. Nela constata-se que efeitos desprezíveis do ângulo θ na perda de pressão total. Comportamento similar ocorre para escoamento descendente segundo inclinação de 60° .

Figura 6.51 Gradientes de pressão de canal horizontal e inclinado 60° com G próximo de $200 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

6.3.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS COM MÉTODOS DE PREVISÃO

Os resultados de perda de pressão obtidos segundo o procedimento descrito nos itens 5.2 e 5.3 foram comparados com métodos de previsão da literatura. As comparações são apresentadas em três itens: canais horizontais, inclinados ascendentes e inclinados descendentes, pois nos dois últimos casos a análise da perda de pressão deve considerar a fração de vazio superficial.

Canais Horizontais

Os métodos foram avaliados considerando os seguintes indicadores: (i) a parcela de resultados previstas com erro entre $\pm 30\%$, que corresponde ao indicador ξ e (ii) o erro médio absoluto η , definido como:

$$\eta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta P_{MEDIDO} - \Delta P_{ESTIMADO}}{\Delta P_{MEDIDO}} \right| \cdot 100 \quad (6.2)$$

A comparação envolveu 342 resultados experimentais para canal posicionado segundo $\theta = 0^\circ$, 343 para $\theta = 45^\circ$ e 283 para $\theta = 60^\circ$. Os métodos de previsão foram implementados adotando como dimensão características o diâmetro hidráulico. Resultados estatísticos dessa análise são apresentados na Tab. 6.10:

Tabela 6.10 Parâmetros estatísticos resultantes da avaliação dos métodos de previsão de Δp_{ATRITO} para canal horizontal.

Método de previsão	$\theta = 0^\circ$		$\theta = 45^\circ$		$\theta = 60^\circ$	
	ξ [%]	η [%]	ξ [%]	η [%]	ξ [%]	η [%]
*McAdams et al. (1942)	34,2	57,2	30,7	63,0	29,0	60,9
*Davidson et al. (1943)	32,7	63,6	31,0	75,3	29,7	68,1
*Akers et al. (1959)	34,2	61,8	31,3	68,9	30,0	66,0
*Cicchitti et al. (1960)	33,6	62,6	31,3	73,4	30,7	66,7
*Owens (1961)	33,0	61,0	31,3	71,8	30,4	66,4
*Dukler et al. (1964)	41,8	36,4	38,9	39,2	32,9	41,6
*Beattie e Whalley (1982)	35,7	48,0	35,7	52,2	31,8	50,9
*Lin et al. (1991)	35,1	63,6	32,5	72,1	30,0	67,2
*Garcia et al. (2003)	43,9	34,6	38,9	37,2	34,3	39,4
*Awad e Muzychka (2008)	34,2	62,9	32,5	70,3	30,7	67,3
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	39,8	49,2	33,9	54,8	29,0	55,6
Lockhart e Martinelli (1949)	40,9	51,5	41,5	57,7	21,9	59,6
Chisholm (1973)	31,3	67,5	31,0	71,4	33,2	65,1
Grønnerud (1979)	29,5	46,0	24,9	47,0	22,3	51,3
Friedel (1979)	21,6	102,3	31,0	103,8	29,0	90,6
Wambsganss et al. (1992)	31,3	51,2	40,4	54,0	42,0	51,6
Mishima et al. (1993)	64,9	32,7	64,9	37,9	65,4	34,2
Mishima e Hibiki (1996)	60,5	35,4	63,5	40,6	66,8	35,6
Lee e Lee (2001)	44,4	46,0	47,4	47,0	44,2	48,7
Yue et al. (2004)	12,0	153,4	10,8	177,4	20,1	152,2
English e Kandlikar (2006)	8,8	49,9	12,9	48,0	7,8	53,8
Ide et al. (2007)	19,6	173,6	19,0	197,1	18,7	172,6
Zhang et al. (2007)	60,8	26,8	53,2	30,7	44,5	35,0
Chen et al. (2007)	46,5	50,4	52,6	56,2	36,4	53,3
Zhang et al. (2010)	67,3	31,2	64,6	36,3	63,3	33,7

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Segundo a Tab. 6.10 os métodos de Zhang et al. (2010) e Mishima et al. (1993) proporcionaram as melhores previsões. A comparação entre estes métodos e os valores experimentais para $\theta = 0^\circ$ encontra-se ilustrada nas Figs. 6.52 e 6.53.

Figura 6.52 Comparação entre resultados experimentais e previstos segundo Mishima et al. (1993) para canal horizontal e $\theta = 0^\circ$.

Figura 6.53 Comparação entre resultados experimentais e previstos segundo Zhang et al. (2010) para canal horizontal e $\theta = 0^\circ$.

Nestas figuras observa-se significativa quantidade de dados sobre-estimados e com desvios superiores ao $\pm 30\%$ em relação aos dados experimentais. Na Fig. 6.54 comparam-se os valores

previstos segundo os métodos de Zhang et al. (2010) e Mishima et al. (1993) com resultados experimentais.

Figura 6.54 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal horizontal para $\theta = 0^\circ$ para $j_L = 0,3051$ m/s.

Nesta figura constata-se que as estimações proporcionadas pelos métodos de Zhang et al. (2010) e Mishima et al. (1993) são significativamente superiores em relação aos resultados experimentais a partir de valores de j_G superiores a 5 m/s.

Canais Inclinados $\phi > 0^\circ$

Este item compara resultados experimentais para canais inclinados com valores estimados a partir de 25 métodos de previsão da perda de pressão por atrito. Para a estimativa da parcela gravitacional, 20 métodos de previsão de fração de vazio superficial foram utilizados. As previsões foram avaliadas com base nos parâmetros estatísticos ξ e η para os respectivos métodos, destacando-se em negrito os métodos que proporcionam melhores previsões.

Os resultados para canas inclinados segundo $\phi = 30^\circ$, 60° e 90° são apresentados nas Tabs. 6.11 a 6.17, que correspondem a resultados para θ igual a 0° , 45° e 60° , respectivamente. De maneira geral, observa-se para esta inclinação que independentemente do método utilizado para a estimativa da fração de vazio superficial, quatro métodos para previsão de perda de pressão por atrito proporcionaram os melhores resultados, sendo eles Wambsganss et al. (1992), Mishima et al. (1993), Mishima e Hibiki (1996) e Zhang et al. (2010). Estes métodos proporcionam estimativas da perda de pressão próximas com diferenças inferiores a 20% em relação ao método de Mishima et al. (1993), conforme ilustrado na Fig. 3.16. Vale resaltar que dos métodos de fração de vazio avaliados, nenhum apresentou resultados superiores em relação aos outros métodos.

Tabela 6.11 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão</div> <div>fração de vazio</div> <div>Método de</div> <div>previsão</div> <div>perda de pressão</div>	Homôgeneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayal e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kamizawa e Ribatski (2014)
*McAdams et al. (1942)	24,8/ 52,5	26,2/ 53,9	19,8/ 60,3	34,6/ 89,6	21,1/ 285,9	28,2/ 52,2	26,8/ 71,7	25,5/ 51,5	27,9/ 52,5	28,9/ 54	13,8/ 135,3	25,8/ 53	27,9/ 282,3	20,5/ 338,9	29,9/ 58,4	28,2/ 52,7	24,5/ 526,1	26,2/ 58,7	29,5/ 49,9	26,8/ 843,4
*Davidson et al. (1943)	21,5/ 59,6	26,5/ 61,4	16,1/ 67	33,6/ 111	21,5/ 259,1	30,2/ 60,3	29,5/ 87,4	22,1/ 58,5	29,2/ 59,8	30,5/ 63,1	13,1/ 152	27,9/ 60,4	28,5/ 360,7	24,5/ 167	31,2/ 70	28,5/ 60,3	24,5/ 473,8	28,5/ 69,7	25,8/ 57,1	29,2/ 1295
*Akers et al. (1959)	23,5/ 56,2	22,8/ 58,4	18,1/ 63,7	33,2/ 99,2	22,1/ 247	26,2/ 56,9	26,2/ 79	24,5/ 55,2	24,8/ 56,9	27,9/ 59	13,8/ 141,3	22,8/ 57,4	27,2/ 314,9	23,5/ 176,8	27,5/ 64,3	24,8/ 57,2	25,5/ 553	26,2/ 64,4	25,8/ 54	25,8/ 1001
*Cicchitti et al. (1960)	20,8/ 60,5	25,8/ 61,8	15,4/ 67,7	36,6/ 110,2	21,1/ 246,5	29,2/ 60,7	31,2/ 86,5	21,5/ 59,4	28,2/ 60,2	29,5/ 63,7	14,1/ 148,3	26,8/ 60,8	29,5/ 360,1	22,8/ 172,7	31,5/ 69,7	27,5/ 60,7	23,8/ 455,2	27,5/ 69,8	25,2/ 58	27,5/ 1293
*Owens (1961)	21,5/ 60,2	26,2/ 61,5	16,1/ 67,6	36,2/ 110,3	21,1/ 247,2	29,2/ 60,4	31,2/ 86,5	22,1/ 59,2	28,2/ 60	29,9/ 63,5	14,1/ 148,6	27,5/ 60,5	29,5/ 361,7	27,9/ 172,4	31,5/ 69,6	27,9/ 60,4	23,8/ 457,5	27,9/ 69,7	26,2/ 57,7	28,2/ 1306
*Dukler et al. (1964)	25,8/ 47,9	31,9/ 43,4	20,1/ 56,5	62,4/ 51	19,8/ 199,6	35,6/ 41	51/ 42,7	26,5/ 46,9	36,2/ 41,5	36,6/ 42,6	22,1/ 100,3	34,9/ 42,4	48,3/ 160,9	29,2/ 172,4	47,7/ 36,5	37,9/ 41,5	23,5/ 356,7	42,6/ 42,7	30,9/ 43,2	46/ 516,1
*Beattie e Whalley (1982)	29,9/ 47,1	35,9/ 46,1	23,5/ 55,6	45,3/ 68	19,8/ 261,4	38,9/ 44,1	35,9/ 57	30,9/ 46,1	38,9/ 44,5	42,3/ 44,6	16,8/ 133,4	36,9/ 45,2	35,2/ 201,2	29,5/ 139,1	39,9/ 46,4	35,9/ 44,7	19,8/ 466,1	35,6/ 47,3	38,6/ 43,7	38,3/ 443
*Lin et al. (1991)	18,8/ 59,5	24,2/ 61	13,1/ 66,7	33,6/ 107,8	21,1/ 243,3	27,5/ 59,8	28,9/ 84,6	19,5/ 58,5	27,2/ 59,5	28,2/ 62,4	14,1/ 146,1	25,8/ 60	26,8/ 349,3	25,5/ 162,5	29,2/ 68,3	26,5/ 59,9	23,8/ 443,1	26,5/ 68,4	22,5/ 57,1	27,5/ 1197
*Garcia et al. (2003)	26,8/ 47,6	33,6/ 42,6	21,1/ 56,3	63,8/ 49,5	19,8/ 193,3	36,6/ 40,2	55,7/ 40,8	27,2/ 46,6	37,2/ 40,7	35,9/ 41,9	22,5/ 95,8	35,2/ 41,7	52,7/ 156,7	24,2/ 171,1	52/ 35,1	38,3/ 40,8	23,2/ 344,1	44,3/ 41,7	30,5/ 42,9	47,7/ 496,2
*Awad e Muzychka (2008)	20,5/ 58,2	23,8/ 59,9	15,1/ 65,5	33,2/ 103,4	21,1/ 239,7	27,2/ 58,5	27,9/ 81,6	21,5/ 57,2	25,5/ 58,3	27,9/ 60,8	13,1/ 141,6	23,5/ 58,9	28,5/ 330,1	29,5/ 138,7	30,5/ 66,1	25,8/ 58,6	23,8/ 542,9	26,8/ 66,4	23,2/ 55,9	27,2/ 1096
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	23,2/ 52,3	28,2/ 51,4	19,1/ 60,4	46/ 73	19,5/ 252,3	30,5/ 49,3	33,2/ 62,7	23,8/ 51,3	29,9/ 49,3	31,9/ 51,4	16,4/ 135,7	28,9/ 50,1	31,2/ 223,9	21,8/ 170,2	34,6/ 50,7	30,9/ 49,4	23,8/ 459,5	32,2/ 53,8	28,5/ 48,6	32,9/ 736,1
Lockhart e Martinelli (1949)	18,1/ 54,3	14,4/ 55,3	17,8/ 62,3	46,3/ 68	30,9/ 220,6	18,1/ 53,3	37,6/ 58,5	19,5/ 53,2	16,8/ 53,8	19,1/ 52,4	24,8/ 122,9	15,1/ 54,5	36,2/ 194,5	27,5/ 147,7	39,9/ 52,4	14,8/ 54,2	27,2/ 454,3	20,8/ 55,4	19,5/ 51,7	33,2/ 485,1
Chisholm (1973)	28,9/ 51,1	32,2/ 55	21,8/ 59,8	26,5/ 151,4	25,5/ 322,1	31,5/ 56,6	24,2/ 105,7	31,5/ 49,8	31,5/ 54,4	31,2/ 63,8	17,4/ 182,2	31,5/ 54,4	25,2/ 577	23,8/ 178,5	25,5/ 77,4	28,9/ 55,9	24,5/ 577,7	26,2/ 73,7	36,9/ 48,3	28,9/ 2106
Grönnerud (1979)	15,1/ 58,7	17,4/ 54,9	13,4/ 65,5	36,9/ 50,9	25,8/ 122	18,1/ 53,4	30,5/ 46,5	15,1/ 57,9	18,1/ 53,5	17,4/ 53,3	28,9/ 75,5	18,1/ 54,2	24,5/ 103,2	11,1/ 193,3	23,8/ 47,8	18,5/ 53,7	19,8/ 234,2	18,8/ 52,9	16,4/ 55,1	19,5/ 194
Friedel (1979)	38,6/ 56,2	33,6/ 68,5	23,8/ 61,7	15,8/ 218,4	13,4/ 429,5	30,9/ 73,6	20,5/ 149	40,6/ 55,2	30,2/ 70,9	31,9/ 81,6	23,2/ 231,2	30,9/ 69,5	24,5/ 774	35,9/ 114,5	24,5/ 107,7	27,2/ 72,9	6,7/ 745,9	27,9/ 96,1	39,9/ 59,9	27,2/ 2506
Wambsganss et al. (1992)	40,9/ 47,7	45,3/ 46,9	20,8/ 58,8	38,9/ 58,4	18,1/ 211,4	46,6/ 45,4	40,9/ 51,2	43/ 46,3	46,3/ 46,3	48,7/ 42,6	25,8/ 99,4	46/ 46,7	47,3/ 118,2	7,4/ 345,8	51,3/ 46,2	44,6/ 46,9	10,1/ 388,5	49/ 46,3	44,3/ 44,2	51/ 270,1
Mishima et al. (1993)	34,9/ 44,3	44,3/ 39,3	18,8/ 55,5	62,1/ 90	22,8/ 218,5	50/ 36,9	60,7/ 59,7	36,9/ 42,8	48,3/ 36,7	49,7/ 42,4	32,2/ 110	46,6/ 38	58,4/ 348,7	14,1/ 247,7	59,7/ 42,3	47,3/ 37	23,5/ 379,6	50,7/ 44,7	43,3/ 38,4	53,7/ 1028

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.11 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayit e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima e Hibiki (1996)	36,9/ 43,7	46,3/ 39	18,8/ 55,4	60,7/ 95,8	23,2/ 231,1	51,7/ 36,7	59,4/ 63,5	39,9/ 42,3	51,3/ 36,6	50/ 42,4	29,2/ 116,5	48,3/ 37,7	58,7/ 366,5	21,5/ 214,2	58,7/ 44,8	52/ 37	21,8/ 399,8	54,7/ 45,6	43/ 37,8	55,7/ 1081
Lee e Lee (2001)	28,5/ 53	37,9/ 50,3	13,4/ 62,3	54,4/ 49	23,8/ 119,1	40,3/ 48,7	50,3/ 44,4	31,2/ 51,9	39,6/ 48,8	41,3/ 47,8	36,2/ 66	37,6/ 49,6	45/ 103,4	19,8/ 223,8	44/ 43,6	36,9/ 49,4	19,5/ 234,5	39,3/ 48,5	40,6/ 49	41,3/ 212,2
Yue et al. (2004)	24,8/ 105,9	23,8/ 123,9	29,9/ 97,6	7,4/ 224,6	6,7/ 540,4	18,1/ 126,7	7/ 191,2	24,8/ 106,7	20,1/ 125,5	13,8/ 130,2	9,1/ 300,3	22,5/ 123,7	7,4/ 482,5	17,4/ 201,5	7,7/ 156,8	19,8/ 124,7	3,7/ 893,3	13,1/ 141,4	23,8/ 115	10,7/ 1199,5
English e Kandlikar (2006)	1,3/ 67,4	3,7/ 62,4	1,3/ 74,2	8,7/ 71,1	50/ 89,2	3,7/ 60,6	7/ 59,7	1,7/ 66,6	3/ 61,6	4/ 62,4	20,8/ 62,7	3/ 62,2	6,4/ 172	10,1/ 547,3	6,7/ 56,5	3/ 61,8	51,7/ 142,7	4,4/ 62,1	2/ 63,9	5/ 410,9
Ide et al. (2007)	19,5/ 128,6	18,8/ 146,5	21,5/ 113,2	5,7/ 215,5	4,7/ 506	21,1/ 147,5	7,4/ 197,5	17,1/ 129,9	20,8/ 147,7	19,8/ 145,9	8,1/ 299,7	20,1/ 146,1	10,4/ 358,9	22,8/ 126,2	14,4/ 169,8	22,5/ 145,7	5,4/ 897,2	20,1/ 155,6	18,5/ 138,8	16,8/ 885,9
Zhang et al. (2007)	17,4/ 48,7	31,2/ 43,2	14,1/ 58,4	63,1/ 69,6	33,6/ 155,2	36,6/ 40,5	58,1/ 48	19,5/ 47,5	36,2/ 41,4	31,5/ 44,7	40,9/ 78	33,6/ 42,4	53,4/ 265,2	16,1/ 634,9	51,7/ 39,3	34,9/ 41,5	24,8/ 275,6	41,6/ 45,8	30,5/ 43,6	46,3/ 763,3
Chen et al. (2007)	40,9/ 49,4	36,9/ 50	23,5/ 57,3	30,5/ 86,7	10,1/ 231,1	36,6/ 48,2	35,9/ 67,3	41,6/ 48,8	34,9/ 49,3	40,9/ 48,3	21,1/ 114,4	34,9/ 49,5	45/ 228,6	28,2/ 168,6	44,3/ 53,4	34,9/ 48,7	8,7/ 400,8	39,3/ 52	37,9/ 48,3	44/ 585,2
Zhang et al. (2010)	33,9/ 44,6	42,3/ 39,6	17,4/ 55,6	63,4/ 86,9	23,5/ 211,3	48,3/ 37,1	60,4/ 57,6	35,6/ 43,2	47,3/ 37	49,3/ 42,5	33,9/ 106,2	44/ 38,2	57,7/ 338,5	16,8/ 297,9	58,1/ 41	47/ 37,2	23,2/ 368	50,3/ 44,6	43,6/ 38,9	52/ 998,8

Tabela 6.12 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 45^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*Mcadams et al. (1942)	27,1/ 55,1	26,5/ 59,2	18,6/ 63,4	23,5/ 141,4	22,9/ 363	27,5/ 60,1	20,6/ 110,3	28,4/ 53,8	26,1/ 58	29,4/ 112,1	12,1/ 313,6	25,2/ 58,2	19,3/ 98,9	29,1/ 186,6	20,6/ 99	25,2/ 59	19,6/ 436,1	22,9/ 82,1	29,4/ 52,6	22,9/ 93
*Davidson et al. (1943)	24,2/ 63,5	28,4/ 67,9	16,7/ 71,9	27,8/ 166,3	22,9/ 358,9	31,7/ 71,2	20,3/ 132,7	25,8/ 62,2	30,4/ 66,9	31,7/ 140,4	11,4/ 292,6	29,4/ 66,9	19,6/ 118,8	29,7/ 196,5	20,9/ 120,4	27,1/ 68,4	19,9/ 464,5	24,8/ 97,2	29,7/ 61	22,9/ 114,5
*Akers et al. (1959)	25,5/ 59,6	26,8/ 64,5	18/ 67,6	24,8/ 152,7	22,9/ 379,2	28,8/ 66,1	20,6/ 120,6	26,8/ 58,3	27,8/ 63,2	29,4/ 124,2	11,8/ 329,4	25,8/ 63,5	18,3/ 108,3	28,4/ 205,8	19,9/ 108,8	24,5/ 64,4	19,9/ 456,3	22,2/ 89,5	25,5/ 57,5	22,9/ 102,8
*Cicchitti et al. (1960)	23,5/ 63,2	27,5/ 67,6	16,7/ 71,5	28,4/ 164,8	22,9/ 354,7	30,7/ 70,8	21,2/ 131,3	25,2/ 61,9	29,4/ 66,6	30,7/ 140,2	11,8/ 289,9	28,4/ 66,6	20,6/ 117,7	28,8/ 191,5	21,2/ 119,6	26,1/ 68,1	20,3/ 461,5	23,9/ 96,7	28,8/ 60,8	23,2/ 113,9
*Owens (1961)	21,9/ 64,4	26,5/ 68,6	15,7/ 72,5	29,7/ 165	22,9/ 333,1	30,1/ 71,8	22,2/ 131,4	23,5/ 63,1	29,4/ 67,4	29,4/ 141,7	11,8/ 291	28,1/ 67,5	21,9/ 117,9	30,1/ 196,1	22,5/ 120,1	27,1/ 68,8	20,3/ 461,5	25,2/ 97,5	27,5/ 61,8	24,2/ 114,6
*Dukler et al. (1964)	28,8/ 45,8	39,2/ 41,4	22,9/ 55,8	53,3/ 108,3	23,5/ 261,8	43,5/ 39	39,5/ 73,7	28,8/ 44,6	42,5/ 38,4	43,5/ 83,5	17/ 216,3	40,8/ 39,7	38,2/ 63,3	43,5/ 116,9	45,4/ 57,4	41,5/ 38,5	21,2/ 310,2	44,4/ 54	41,2/ 40	44,4/ 62,4
*Beattie e Whalley (1982)	36,3/ 47,7	35/ 48,9	23,5/ 56,9	21,9/ 123,7	18,3/ 330,7	36,6/ 47,7	21,2/ 92,9	38,6/ 46,5	35,3/ 48,1	37,9/ 98,4	15,7/ 273,6	34,3/ 48,3	22,2/ 84,3	31,7/ 148,5	23,9/ 78,2	31/ 49	17,6/ 398,8	27,5/ 68,8	40,8/ 44	26,1/ 81,9
*Lin et al. (1991)	22,5/ 62,4	29,1/ 66,1	14,7/ 70,7	28,4/ 161,8	22,9/ 349,2	32/ 68,7	22,5/ 127,8	24,2/ 61,1	30,1/ 64,7	32,4/ 135,1	11,4/ 278,6	29,7/ 64,9	21,2/ 114,3	31,7/ 217,3	21,6/ 115,7	28,1/ 66,1	20,3/ 457,5	26,8/ 93,9	28,4/ 59,9	24,8/ 109,8
*Garcia et al. (2003)	28,4/ 44,9	41,2/ 39,6	21,6/ 55	58,2/ 104,2	23,5/ 253,3	45,8/ 37	45,4/ 69,6	28,4/ 43,7	45,8/ 36,6	47,1/ 80,7	16,3/ 206,3	44,8/ 38	44,1/ 59,5	45,8/ 106,5	47,1/ 53,8	45,4/ 36,6	21,2/ 300,5	47,4/ 51,6	41,5/ 38,8	48/ 59
*Awad e Muzychka (2008)	21,6/ 61,4	26,8/ 65,5	16,3/ 69,5	27,5/ 156,4	22,9/ 371	30,4/ 67,5	22,5/ 123,3	23,2/ 60,1	28,1/ 64	31/ 129,4	11,8/ 270,2	27,8/ 64,4	20,9/ 110,5	31,7/ 212,7	21,6/ 111,6	25,8/ 65,2	19,9/ 459,2	25,2/ 91,5	26,1/ 59,1	25,8/ 105,9
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	25,8/ 54,2	28,1/ 55,2	18,6/ 63,2	27,5/ 140,8	22,9/ 328,9	31,4/ 54,9	23,5/ 105,1	26,1/ 52,9	30,4/ 52,9	31,7/ 112	14,7/ 290,2	29,4/ 53,5	23,9/ 92,3	30,7/ 178,6	24,8/ 86,6	29,1/ 53,8	20,9/ 384,8	26,8/ 76,3	33 49,9	25,8/ 89,1
Lockhart e Martinelli (1949)	14,7/ 56,7	29,7/ 58,8	14,4/ 65,3	43,1/ 137,7	23,5/ 316,6	34/ 56,4	36,3/ 86,7	18/ 55,3	31,7/ 56,1	36,9/ 89	24,5/ 282,6	29,4/ 57,2	34,3/ 77,2	37,6/ 168,6	35,6/ 75,6	28,4/ 56,3	20,3/ 387,1	31,4/ 69,8	26,8/ 53,5	32,7/ 73,3
Chisholm (1973)	31,4/ 55,2	30,4/ 64,7	20,9/ 64,5	25,8/ 238,3	22,2/ 408,1	30,7/ 74,3	21,9/ 173,8	33,7/ 53,6	28,4/ 65,7	32,7/ 192,6	17/ 385,9	29,7/ 64,8	19,6/ 152,6	30,1/ 230,3	20,9/ 158,8	25,2/ 69	19,6/ 495,3	23,9/ 119,9	35/ 53,8	22,2/ 148,3
Grönnerud (1979)	17,3/ 56,7	19,3/ 52,6	15/ 64,7	52,6/ 63,6	22,9/ 174,1	20,6/ 50,1	45,1/ 48,3	17,3/ 55,8	20,9/ 50,3	19,3/ 62	24,2/ 145,7	20,9/ 51,3	39,5/ 47,2	22,5/ 109,4	37,6/ 49,7	21,2/ 50,4	22,9/ 239,9	23,5/ 51,5	19,6/ 52,2	30,1/ 50
Friedel (1979)	34,6/ 65	31/ 85	22,5/ 68,4	9,8/ 347,4	2,9/ 565,6	27,5/ 100,2	19,3/ 239,7	37,6/ 64,2	27,8/ 89,6	28,8/ 248,8	22,2/ 466	29,7/ 86,8	21,6/ 208,3	25,5/ 254	22,2/ 216,3	25,8/ 93,2	2,6/ 731,4	25,5/ 162,9	34,3/ 72,4	23,9/ 195,7
Wambsganss et al. (1992)	44,4/ 46,7	50,7/ 49,8	23,2/ 58,6	29,4/ 109,8	4,6/ 327	52,6/ 48,1	31/ 78,2	46,1/ 45,2	48,7/ 49,1	60,5/ 69,8	24,2/ 198,8	50,3/ 49,4	35/ 66,8	45,4/ 133	39,2/ 62	47,1/ 49,5	2/ 438,6	48/ 56,2	50,7/ 45,9	42,8/ 60,4
Mishima et al. (1993)	42,5/ 41,6	53,6/ 37,1	20,9/ 55	43,8/ 170,1	16,7/ 302	58,5/ 38,6	41,2/ 104,1	45,4/ 39,8	59,8/ 35,6	58,2/ 113,8	25,8/ 234,9	56,5/ 36,1	48,4/ 88,3	59,8/ 130	52,6/ 89,2	57,5/ 37	5,2/ 386,3	56,2/ 71,9	50,7/ 34,3	57,5/ 82,8

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.12 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 45^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Walls (1969)	Zuber e Findlay (1965)	Rouhani e Axelsson (1970)	Ishii (1977)	Woldesenayat e Ghajar (2007)	Lockhart e Martinelli (1949)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Walls (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima e Hibiki (1996)	41,5/ 41,2	56,2/ 38,5	21,9/ 55	38,2/ 180,9	14,1/ 318,1	58,5/ 40,8	31,4/ 111,3	43,8/ 39,3	59,5/ 37,4	58,8/ 119,8	26,1/ 247,7	57,5/ 37,8	40,2/ 94,5	59,8/ 138	46,1/ 95,3	57,5/ 39,2	3,9/ 405,2	55,9/ 76,2	54,2/ 35	56,9/ 88,1
Lee e Lee (2001)	36,6/ 49,5	43,5/ 45,9	16,3/ 60,6	51,3/ 71,6	20,6/ 246,1	44,4/ 43	51,3/ 54	40,5/ 48,1	45,4/ 43,6	47,4/ 57,1	25,5/ 125,9	42,8/ 44,6	54,6/ 48,8	50/ 107,8	54,6/ 49,1	44,4/ 43,9	7,2/ 333,9	49,7/ 46,1	45,1/ 44	52/ 46,3
Yue et al. (2004)	23,2/ 125,9	16/ 153,1	22,5/ 127,4	13,4/ 162,5	10,8/ 263,7	9,2/ 368,5	9,5/ 211,8	6,5/ 256,2	27,8/ 112,1	3,3/ 398,5	1,6/ 738,9	3,6/ 288,9	15,4/ 156,4	6,2/ 550	15/ 153,3	7,8/ 243,9	14,7/ 156,4	1,3/ 943,9	17,3/ 140,3	8,5/ 234,8
English e Kandlikar (2006)	3,9/ 63,6	6,2/ 56,9	3,9/ 62,6	8,5/ 54,3	5,9/ 83,8	5,9/ 76	6,5/ 64,3	9,5/ 61,4	3,3/ 71,5	28,4/ 88,9	55,9/ 117,6	18,3/ 64,3	6,2/ 55,6	35,3/ 96,4	5,9/ 56,6	8,8/ 63,6	6,2/ 55,6	44,4/ 156,6	5,2/ 59	7,5/ 65,6
Ide et al. (2007)	18,3/ 148,4	16,7/ 173,3	18/ 150	14,4/ 178,4	14,4/ 239,6	12,7/ 338,9	12,1/ 206,8	8,2/ 248,8	19/ 128,4	5,6/ 334,6	1,6/ 720,4	4,6/ 276	14,4/ 176	6,9/ 508,7	16,7/ 173,4	8,8/ 236,9	14,7/ 174,3	1,3/ 1016,9	18,3/ 162,2	10,1/ 227,8
Zhang et al. (2007)	26,1/ 45,3	44,8/ 38,5	29,7/ 43,8	48,7/ 37,3	52/ 94,2	55,2/ 99,1	50,3/ 58,9	60,5/ 61,4	13,4/ 56,6	65,7/ 119,8	23,5/ 218,7	60,8/ 71,1	48,4/ 35,4	31,4/ 169,1	45,8/ 36,9	58,5/ 63,7	46,7/ 35,8	18,6/ 287,9	45,4/ 38,6	55,6/ 63,8
Chen et al. (2007)	38,2/ 51,1	35,6/ 54,3	37,6/ 50,6	41,2/ 53,7	45,4/ 101	36,6/ 132	41,5/ 74,3	28,8/ 91	29,4/ 57,9	21,2/ 162	3,3/ 337,1	23,5/ 107,1	38,6/ 53,5	17,6/ 226,8	38,6/ 53,5	31,7/ 87,1	41,5/ 52,3	2/ 454,4	32/ 51,7	38,2/ 82
Zhang et al. (2010)	42,2/ 41,8	52,9/ 36,6	44,8/ 40,1	58,5/ 37,5	57,8/ 111,1	60,1/ 126	55,6/ 69,5	51/ 84,9	20,6/ 55	46,7/ 164,1	18,6/ 292,9	45,1/ 100,1	57,8/ 34,6	26,1/ 227,7	55,9/ 35,2	55,6/ 85,9	56,5/ 35,9	5,9/ 375,5	50,7/ 34,3	57,5/ 79,8

Tabela 6.13 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão</div> <div>fração de vazio</div> <div>Método de</div> <div>previsão</div> <div>perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*McAdams et al. (1942)	28,9/ 53,5	26,9/ 56,5	18,6/ 63,4	20,9/ 268,7	26,2/ 1297,8	27,9/ 61	19,3/ 104,1	30,6/ 52,1	25,2/ 55,1	28,6/ 124,5	12/ 277,4	25,6/ 55,6	19,9/ 193,5	27,9/ 224,4	21,6/ 133,7	24,9/ 56,2	22,6/ 70,2	22,6/ 78,8	32,6/ 50,5	19,9/ 108,2
*Davidson et al. (1943)	24,9/ 60,5	29,9/ 63,2	16,7/ 71,9	25,9/ 340,8	26,2/ 1069,7	30,6/ 71,7	20,6/ 122,2	26,6/ 59	29,2/ 61,8	32,6/ 153,6	12/ 246,8	29,2/ 62,1	19,6/ 247,8	30,9/ 239	23,3/ 162,3	26,9/ 63,5	22,6/ 632	26,6/ 91,1	29,9/ 57,2	23,3/ 128,1
*Akers et al. (1959)	27,6/ 57,1	26,6/ 60,8	18/ 67,6	22,3/ 296,3	26,6/ 1364,7	27,9/ 66,8	20,3/ 112,8	29,2/ 55,6	26,2/ 59,4	27,9/ 136,9	12,3/ 288,7	25,6/ 59,8	20,3/ 214,8	27,6/ 246,1	22,6/ 146,4	24,6/ 60,8	22,9/ 701,5	21,3/ 85,2	27,9/ 54,4	21,9/ 117,5
*Cicchitti et al. (1960)	24,9/ 60,1	29,9/ 62,8	16,7/ 71,5	25,6/ 340,7	24,3/ 1069,7	30,6/ 71,3	20,6/ 122	26,6/ 58,7	29,2/ 61,5	32,6/ 153,3	12/ 246	29,2/ 61,8	19,6/ 247,6	30,9/ 236,5	23,3/ 162	26,9/ 63,2	23,3/ 630,6	26,6/ 90,8	29,9/ 56,9	23,3/ 127,8
*Owens (1961)	24,9/ 60,6	30,2/ 63,5	15,7/ 72,5	24,9/ 343,4	24,3/ 1083,2	30,6/ 72,1	20,3/ 123,1	26,9/ 59,2	29,6/ 62,2	32,2/ 154,6	12/ 248,3	29,6/ 62,4	19,3/ 249,8	30,9/ 242,2	23,3/ 163,4	26,9/ 63,9	23,3/ 634,9	26,2/ 91,7	29,9/ 57,4	22,6/ 128,9
*Dukler et al. (1964)	24,9/ 47	39,9/ 41,5	22,9/ 55,8	52,8/ 174,5	27,6/ 856,7	43,5/ 39,4	44,5/ 68,2	25,6/ 45,7	42,9/ 38,3	44,9/ 95,4	15,6/ 191,5	42,5/ 39,7	40,2/ 142,2	45,5/ 131,9	41,9/ 77,3	43,2/ 38,1	24,3/ 466,4	43,9/ 53,1	38,5/ 40,8	45,2/ 73,4
*Beattie e Whalley (1982)	35,9/ 47,2	38,5/ 47	23,5/ 56,9	23,6/ 193,8	19,9/ 1100,6	38,5/ 47,8	21,3/ 91,2	39,5/ 45,8	36,2/ 46	38,2/ 99	14/ 247,5	36,9/ 46,3	22,9/ 180,3	33,6/ 177,1	23,9/ 101,7	33,2/ 46,6	19,6/ 596,4	28,2/ 65,4	40,5/ 42,8	26,2/ 88,5
*Lin et al. (1991)	22,6/ 60,3	28,9/ 62,6	14,7/ 70,7	25,6/ 329,3	24,3/ 980	30,6/ 70,2	21,9/ 119	24,3/ 58,9	28,2/ 61	32,6/ 149,4	12/ 240,9	28,6/ 61,4	22,9/ 238,3	33,6/ 262,4	24,9/ 157,7	26,9/ 62,5	23,3/ 720,3	26,6/ 89,2	28,6/ 57,1	25,6/ 124,9
*Garcia et al. (2003)	25,9/ 46,3	40,5/ 40	21,6/ 55	57,8/ 169,3	27,9/ 817,3	45,8/ 38,1	46,8/ 64,4	26,9/ 45	45,8/ 36,9	45,2/ 92,4	15,6/ 185,1	44,5/ 38,3	43,2/ 136,3	47,2/ 120,6	43,5/ 73,7	46,2/ 36,5	24,3/ 453,1	46,5/ 50,6	38,2/ 39,9	47,8/ 70,2
*Awad e Muzychka (2008)	24,3/ 59,6	27,6/ 62,3	16,3/ 69,5	25,6/ 312	24,3/ 965,8	29,9/ 68,8	22,3/ 114,9	25,9/ 58,2	27,9/ 60,6	30,6/ 143,1	12/ 236,3	27,6/ 61,1	22,9/ 225,6	32,2/ 255,8	25,9/ 151	25,9/ 61,9	22,9/ 709,9	24,9/ 87	26,2/ 56,6	25,2/ 120,5
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	26,6/ 53,2	30,2/ 52,9	18,6/ 63,2	27,2/ 238,7	27,6/ 1158,4	32,6/ 54,9	24,6/ 97,7	27,2/ 51,8	32,6/ 50,6	32,6/ 124,1	12,6/ 251,4	30,2/ 51,4	22,6/ 194,8	29,2/ 209,8	24,9/ 112,8	30,6/ 51,5	24,3/ 597,6	27,2/ 73,1	33,2/ 48,3	24,6/ 101,6
Lockhart e Martinelli (1949)	16,3/ 55,2	27,9/ 56,1	14,4/ 65,3	44,2/ 185,3	26,9/ 1129,1	34,6/ 55,1	35,5/ 80,4	17,9/ 53,7	31,6/ 53,2	37,2/ 95,6	23,3/ 232,8	30,9/ 54,5	33,2/ 131,7	36,2/ 194	35,2/ 96,7	29,9/ 53,2	22,3/ 608,1	30,9/ 66,2	25,9/ 51,5	32,2/ 83,9
Chisholm (1973)	33,9/ 51,8	30,6/ 60,5	20,9/ 64,5	26,6/ 544,2	25,2/ 1513,8	30,2/ 82	20,6/ 161,7	36,2/ 50,1	27,6/ 62,4	29,9/ 217,6	15,3/ 327,1	28,6/ 61,1	19,6/ 371,5	27,6/ 314,2	19,6/ 237,1	22,9/ 66,7	21,6/ 747,1	20,9/ 113,7	39,9/ 49,9	20,9/ 176,8
Grönnerud (1979)	14,3/ 57,5	18,6/ 52,9	15/ 64,7	50,5/ 87,1	20,6/ 571,1	20,6/ 49,5	45,5/ 46,6	14,3/ 56,5	20,6/ 50,6	18,3/ 66,9	23,3/ 126	20,3/ 51,7	43,9/ 68,9	23,3/ 123,8	38,5/ 58,9	20,6/ 50,6	25,2/ 335,7	22,3/ 52,1	16,9/ 52,8	29,9/ 56,6
Friedel (1979)	34,9/ 61,8	31,6/ 81,8	22,5/ 68,4	14/ 728,9	2,3/ 1725,1	28,9/ 114	20,6/ 226,6	38,5/ 60,6	29,6/ 87,8	27,2/ 283,3	23,3/ 415,4	30,9/ 84,4	22,6/ 477,4	25,9/ 367,7	23,3/ 323,6	27,2/ 92,8	0,7/ 1012,3	26,2/ 156,4	36,5/ 68,9	24,6/ 240,6
Wambsganss et al. (1992)	45,2/ 46	51,8/ 48,3	23,2/ 58,6	30,2/ 138,4	11,6/ 728,8	54,8/ 46,2	31,6/ 74,3	48,2/ 44,5	52,2/ 48	60,5/ 75,9	25,2/ 194,6	50,8/ 48,2	33,9/ 111,3	45,8/ 149,1	35,9/ 74,1	49,8/ 48,3	2/ 563,6	48,8/ 55,1	50,2/ 44,6	41,2/ 69
Mishima et al. (1993)	42,5/ 41,2	55,8/ 35,1	20,9/ 55	42,5/ 334,4	23,6/ 836,9	59,1/ 43,3	42,2/ 98,6	44,5/ 39,3	59,1/ 33,3	58,1/ 131,2	24,3/ 216,1	58,5/ 33,8	47,5/ 216,5	60,5/ 188,2	51,2/ 139,8	57,5/ 35,1	6,6/ 522,4	55,8/ 68,2	52,5/ 33,1	55,5/ 108,6

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.13 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayt e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima e Hibiki (1996)	43,2/ 40,6	56,8/ 36,1	21,9/ 55	39,5/ 353,3	19,9/ 880,8	60,5/ 45,8	31,6/ 105,2	46,2/ 38,6	61,1/ 35,1	58,8/ 137,6	24,6/ 227,6	58,5/ 35,4	42,2/ 228,9	62,1/ 199	47,8/ 148,2	58,8/ 37,3	4,3/ 548,1	56,5/ 72,4	55,8/ 33,1	54,2/ 115,2
Lee e Lee (2001)	34,2/ 50,6	44,2/ 46,4	16,3/ 60,6	49,8/ 101,3	23,9/ 389,5	48,8/ 42,8	49,2/ 54,2	36,5/ 49,2	47,2/ 44	48,5/ 63	24,9/ 141,9	45,8/ 45,2	52,8/ 77,1	49,2/ 125,1	52,5/ 60,1	45,8/ 44,2	14/ 431,2	48,8/ 46,6	46,2/ 45	50,8/ 54,2
Yue et al. (2004)	20,6/ 121,3	15,3/ 147	27,8/ 112,1	6/ 557,1	0/ 1769,4	13,3/ 163,4	6,6/ 274,8	19,6/ 122,3	16,6/ 150,2	12,3/ 283,2	8,3/ 517,8	16,6/ 147,2	9,3/ 427,7	13/ 432,1	10/ 292,5	17,3/ 150,7	0/ 1224,1	12/ 202,6	18,6/ 134,5	12/ 263
English e Kandlikar (2006)	3,7/ 64,3	7/ 57,4	3,3/ 71,5	26,6/ 150,3	52,2/ 306,7	8,3/ 55,4	18,3/ 62,4	3,7/ 63,2	6,3/ 55,7	5,6/ 92,1	33,2/ 91,2	6,3/ 56,9	10,3/ 108,7	5,6/ 98,2	9,3/ 83,7	6,3/ 55,5	46,8/ 208,9	6,3/ 64,3	4/ 59,4	8/ 76,6
Ide et al. (2007)	16,3/ 145,9	15,6/ 170,7	19/ 128,4	4/ 437,7	3,3/ 1678,2	13,6/ 182,3	3/ 271,7	16,6/ 147,3	13,6/ 173,9	11,6/ 255,5	6,3/ 475,7	14,6/ 171,1	8,3/ 373,2	10,3/ 444,8	9,3/ 272,7	14/ 172,6	1/ 1276,3	11/ 205,3	17,9/ 159,7	9,3/ 255,5
Zhang et al. (2007)	21,9/ 45,9	46,5/ 38,6	13,4/ 56,6	65,8/ 242,3	24,9/ 609,2	50,5/ 41,4	56,8/ 68,1	24,3/ 44,3	49,5/ 35	51,8/ 108,6	29,2/ 156,7	47,8/ 36,8	57,5/ 156,1	55,1/ 142,9	57,5/ 101,5	50,2/ 35,4	22,6/ 388,3	52,5/ 57,4	42,9/ 38,8	57,1/ 83,5
Chen et al. (2007)	39,5/ 51,4	39,2/ 53,3	29,4/ 57,9	20,3/ 248,4	5,6/ 770,7	40,9/ 55,3	22,9/ 103,5	39,5/ 50,7	38,9/ 52,6	46,5/ 112,9	18,3/ 217,9	38,9/ 52,7	28,9/ 174,4	39,9/ 167,2	32,6/ 116,9	42,5/ 51,3	1,7/ 577	41,2/ 72,5	35,2/ 51,1	36,5/ 100,3
Zhang et al. (2010)	42,5/ 41,6	55,1/ 34,9	20,6/ 55	45,2/ 323,9	23,6/ 812,1	58,1/ 42,1	45,8/ 95	44,5/ 39,7	59,5/ 32,4	56,8/ 128,2	24,3/ 209,6	57,8/ 33,2	49,8/ 209,6	59,8/ 182,2	54,2/ 135,2	56,1/ 34,1	8/ 507,8	55,5/ 65,9	49,5/ 33,3	56,8/ 105

Tabela 6.14 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 0^\circ$ (ξ [%]/ η [%]).

<div>Método de previsão</div> <div>fração de vazio</div> <div>Método de</div> <div>previsão</div> <div>perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Permoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishi (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*McAdams et al. (1942)	26/ 51,9	27,3/ 54,4	13,6/ 72	21,1/ 184,5	6,8/ 2023,5	30,5/ 146,9	23,7/ 173,2	28,6/ 50	28,2/ 53,2	33,4/ 113,3	14,3/ 332,7	26,6/ 53,3	19,5/ 245,7	31,2/ 246,9	10,4/ 108,5	11,7/ 112,5	0/ 1251,3	18,8/ 94,1	34,4/ 46	28,2/ 53,2
*Davidson et al. (1943)	22,7/ 58,8	28,9/ 63	11,4/ 80,1	24/ 213	6,8/ 2089,2	31,5/ 194,4	23,7/ 205,2	25/ 56,9	30,5/ 62,6	31,8/ 141,1	15,9/ 357,1	30,2/ 62,1	19,2/ 303	27,9/ 309,1	12/ 124,6	13/ 130,3	0/ 1345,3	21,1/ 110,6	31,8/ 53,7	26/ 61,6
*Akers et al. (1959)	24/ 55,3	27,3/ 59,6	13,3/ 75,9	21,1/ 197,2	6,8/ 2064	31,2/ 165,9	24/ 187,2	26,3/ 53,4	28,2/ 58,7	32,1/ 125,6	14,9/ 353,7	27,6/ 58,5	20,1/ 270,2	27,6/ 274,3	10,7/ 117,6	13/ 122,1	0/ 1322,1	17,9/ 102,5	32,1/ 50,2	25/ 58
*Cicchitti et al. (1960)	22,7/ 58,9	27,9/ 63,2	11,4/ 79,8	24/ 206,1	7,1/ 2085,7	30,2/ 194,6	23,4/ 201,7	25/ 57,1	29,2/ 62,8	30,2/ 141,4	15,9/ 349,3	28,9/ 62,3	19,5/ 301,2	27,9/ 307,5	11/ 124,3	12/ 129,9	0/ 1339,9	21,1/ 110,2	30,5/ 54,1	25/ 61,9
*Owens (1961)	21,8/ 59,6	27,3/ 64,1	11,7/ 80,5	24/ 206,5	7,1/ 2089	29,5/ 196,6	23,4/ 202,2	24,4/ 57,7	28,2/ 63,5	28,9/ 142,7	15,9/ 350,9	27,9/ 63,1	19,5/ 302,6	28,6/ 310,6	9,7/ 125,6	11,7/ 131,3	0/ 1347,2	21,4/ 110,8	29,9/ 54,9	24,7/ 62,6
*Dukler et al. (1964)	19,8/ 49,3	39/ 41,4	11,4/ 66,5	47,4/ 172,5	8,8/ 1647	44,2/ 92,6	30,5/ 157,6	20,8/ 47,5	45,1/ 37,4	45,1/ 101,9	12,7/ 229,6	43,8/ 39,1	30,8/ 249,4	41,9/ 162,8	16,2/ 74,4	21,1/ 76,3	0/ 908	42,5/ 71,6	34,7/ 40,7	37/ 43,3
*Beattie e Whalley (1982)	29,5/ 47,6	37,3/ 45,7	14,3/ 67,4	20,8/ 196,4	3,6/ 2010	39,6/ 101,3	21,1/ 199,9	33,4/ 45,8	36,4/ 45	41,9/ 125	17,2/ 294,5	36,4/ 45	19,8/ 330,5	35,4/ 207,5	12,3/ 93,8	14/ 96,3	0,6/ 1142,1	25,3/ 83,9	45,1/ 40,2	35,7/ 45,9
*Lin et al. (1991)	20,5/ 58	29,2/ 61,4	10,4/ 78,8	24/ 204,9	7,5/ 2089	31,8/ 185,5	23,7/ 198,1	23,1/ 56,1	30,5/ 60,6	32,5/ 136,6	15,9/ 362,3	28,6/ 60,4	19,5/ 293,3	28,9/ 287,1	12,7/ 120	14,3/ 125,1	0/ 1362,2	21,1/ 107,3	29,2/ 53	24,7/ 60,6
*Garcia et al. (2003)	24,7/ 49	40,3/ 40,1	12,3/ 65,7	53,6/ 168,2	9,1/ 1630,2	47,7/ 89,4	34,4/ 152,4	25,3/ 47,3	47,1/ 36,1	45,8/ 99,2	12,7/ 218,7	45,5/ 37,8	39/ 242,3	45,5/ 151,5	16,9/ 70,7	22,1/ 72,3	0/ 880,3	47,4/ 68,8	36,7/ 40,3	36,4/ 42,5
*Awad e Muzychka (2008)	21,8/ 56,9	27,9/ 60,7	11,7/ 77,6	22,4/ 201,1	7,5/ 2073	30,5/ 175,5	24,7/ 191	24,4/ 55	27,9/ 59,7	31,8/ 130,5	15,3/ 357,8	26,9/ 59,5	20,1/ 279,3	29,5/ 280,1	11/ 118,5	14,3/ 123	0/ 1337,1	20,5/ 104	29,2/ 51,9	22,7/ 59,6
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	22,4/ 53,2	32,5/ 52,2	11,7/ 73,1	23,7/ 209,8	8,1/ 1777,6	32,8/ 128	23,4/ 200,5	23,1/ 51,4	31,2/ 49,6	33,8/ 127,3	11,7/ 304,9	31,2/ 50,2	22,4/ 313,3	31,2/ 237,4	13,6/ 100,1	16,2/ 104,1	0/ 1121,2	25/ 94,5	35,7/ 45,9	29,2/ 51,2
Lockhart e Martinelli (1949)	20,8/ 55	21,1/ 56,3	12,7/ 74,8	25,3/ 214,2	0/ 1808,5	33,4/ 109,1	29,5/ 179,2	23,4/ 52,9	32,1/ 53	26,9/ 115,4	22,7/ 302,5	30,5/ 54,4	31,8/ 265,5	37/ 240,4	8,1/ 108,2	13/ 110,3	0/ 1241	30,2/ 91,9	25,6/ 49,1	20,8/ 56,1
Chisholm (1973)	30,2/ 51,7	30,8/ 62	14,9/ 74,5	18,8/ 293,8	1,3/ 2203	32,1/ 293,4	22,7/ 282,5	33,8/ 49,5	28,2/ 65	32,1/ 196,7	18,2/ 389,7	27,9/ 62,6	21,4/ 447,1	31,2/ 311,1	12,7/ 122	13/ 134,1	0/ 1370,9	21,1/ 141,8	38,3/ 47	31,2/ 56,4
Grønnerud (1979)	14/ 59,3	19,2/ 52,7	8,8/ 73	60,7/ 97,7	14,9/ 1295	19,8/ 68,7	51,9/ 98,2	14,3/ 57,9	21,1/ 49,4	21,8/ 70,9	12,3/ 182,3	20,1/ 51,1	44,8/ 157,4	29,2/ 162,2	15,9/ 75,9	15,9/ 77,3	1,6/ 728,7	30,8/ 58,4	17,2/ 52,9	17,9/ 53,9
Friedel (1979)	35,7/ 53,9	29,9/ 78,2	18,2/ 72,4	3,6/ 425	0/ 3679,4	30,2/ 370,9	7,1/ 385,8	38/ 52,4	27,9/ 86,1	29,5/ 249,3	19,2/ 496,4	28,9/ 81,2	18,2/ 574,1	25/ 368,8	13/ 147,5	11/ 163,3	0/ 1918	26/ 188,5	37/ 60,8	28,6/ 71,2
Wambsganss et al. (1992)	39,6/ 48,9	50/ 48	11,4/ 72,9	10,1/ 211,4	0/ 2563,9	55,2/ 74,1	17,5/ 163,5	43,2/ 46,6	54,2/ 46,8	57,5/ 81,6	22,1/ 272,9	49,7/ 47,4	31,2/ 220,3	45,1/ 235,6	10,1/ 102,9	15,6/ 102,7	0/ 1276,2	45,5/ 71,5	47,7/ 42,9	44,8/ 49,7
Mishima et al. (1993)	32,5/ 46,1	47,1/ 39,1	8,8/ 68,5	14,9/ 234,6	0,3/ 2255,4	54,5/ 162,4	28,2/ 195	37/ 43,6	54,5/ 36,6	56,5/ 125	23,4/ 244,4	52,6/ 37	38/ 294,6	58,4/ 212	20,8/ 84,5	23,7/ 89,9	0/ 1111,7	54,9/ 90,8	47,4/ 35,9	39/ 41

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.14 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazão</div> <div>Método de previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayit e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima e Hibiki (1996)	36,4/ 45,7	51,6/ 39,4	8,4/ 69	11,7/ 247,8	0,3/ 2343	56,8/ 170,6	26,9/ 206,9	41,2/ 43,2	56,8/ 38,4	57,8/ 129,6	23,7/ 257,1	54,5/ 38,3	32,5/ 311,1	56,8/ 223,8	21,1/ 88	22,7/ 94,3	0/ 1161,5	54,5/ 95,9	47,4/ 35,3	39,9/ 41,5
Lee e Lee (2001)	26,6/ 53,5	39,3/ 49,1	8,1/ 72,9	16,2/ 154,2	1,6/ 2073,1	43,5/ 67,2	32,1/ 94	29,5/ 51,5	40,9/ 45,3	45,5/ 64,7	23,1/ 206	39,3/ 47,3	40,9/ 114,9	49,4/ 185,6	12/ 91,6	12,7/ 91,8	0/ 1027,7	47,7/ 55,7	43,8/ 46,2	38/ 49,9
Yue et al. (2004)	25,6/ 53,5	39,3/ 49,1	27,6/ 115,2	3,2/ 551,8	0/ 5309,9	43,5/ 67,2	3,6/ 480,6	29,5/ 51,5	14,3/ 149,9	45,5/ 64,7	5,2/ 622,5	14,9/ 144,8	5,2/ 649,2	49,4/ 185,6	32,8/ 240,1	27,9/ 251,3	0/ 2821,8	47,7/ 55,7	22,4/ 125,6	18,8/ 136
English e Kandlikar (2006)	24/ 108	14/ 144,1	6,5/ 76	42,2/ 105,6	26,9/ 1160	12,7/ 288,6	39,9/ 89,2	21,1/ 110	6,5/ 56,9	9,1/ 285	28,6/ 98,8	6,5/ 58,5	21,4/ 136,3	8,1/ 609,1	16,2/ 58,5	14,6/ 60,1	0/ 491,3	7,1/ 248,7	0,3/ 61,9	2,9/ 62,5
Ide et al. (2007)	0,3/ 68,1	8,1/ 59,1	26/ 119,6	1,9/ 475,6	0/ 5880,3	8,4/ 100,9	2,3/ 424,3	1/ 66,6	14,3/ 166,3	4,9/ 90,6	3,6/ 610,3	14,3/ 161,6	5,8/ 537,5	3,6/ 105,7	20,1/ 258,1	22,4/ 261,6	0/ 3200,4	8,1/ 73,3	18,2/ 145,6	19,5/ 155,7
Zhang et al. (2007)	16,9/ 127	15,3/ 161,1	9,4/ 67,6	44,2/ 168,1	1/ 1796,4	13,3/ 250,1	49,4/ 135,4	16,2/ 130	47,7/ 37,2	14/ 253,7	25,6/ 180,2	43,8/ 39	57,5/ 213,6	9,4/ 588,1	19,8/ 68,7	25,6/ 71,3	0/ 852	8,4/ 234,3	36/ 40,8	37,7/ 43,8
Chen et al. (2007)	16,6/ 49,7	43,2/ 41	13,3/ 71,3	10,7/ 248,3	0,3/ 3000,4	47,7/ 129,9	13,3/ 200,2	19,5/ 47,7	39/ 53	49/ 103,6	14/ 268,9	38,6/ 52,6	23,1/ 272,7	54,9/ 158,7	21,4/ 105,1	27,9/ 105,3	0/ 1412,3	52,3/ 72,7	35,1/ 49,9	31,2/ 55,8
Zhang et al. (2010)	38,6/ 50,9	34,7/ 53,3	9,1/ 68,2	16,9/ 227,2	0,3/ 2204,4	40,3/ 122,4	31,5/ 188,2	39,9/ 50	53,9/ 35,6	43,8/ 112,6	23,1/ 237,3	49/ 36,7	39,9/ 285,4	28,9/ 237,9	20,5/ 82,6	24,4/ 87,5	0/ 1083,1	35,4/ 93,8	45,5/ 36,3	39,3/ 40,9

Tabela 6.15 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 45^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishi (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*Mcadams et al. (1942)	25,9/ 51	27,7/ 53,9	20,6/ 61,8	17,4/ 183	7,2/ 468,4	29,9/ 69,9	21,2/ 604,9	27,4/ 49,2	27,7/ 51,5	32,7/ 58,7	16,8/ 529,5	27,1/ 51,9	23,1/ 103,3	32,7/ 387,7	12,5/ 172	12,1/ 105,1	1,2/ 1133	24,9/ 1428,6	34,6/ 45	28,7/ 52,3
*Davidson et al. (1943)	20,9/ 58,7	29,9/ 63,5	15,3/ 68,8	18,7/ 221,6	6,9/ 509,8	34/ 87,1	22,4/ 784,1	22,7/ 56,8	32,7/ 62,2	33/ 69,8	17,1/ 555,7	31,2/ 61,4	22,1/ 122	31,5/ 500,6	12,8/ 204,3	11,2/ 126,1	1,2/ 1157	25,2/ 1636,6	30,5/ 53,1	25,9/ 61,1
*Akers et al. (1959)	23,1/ 55,1	25,9/ 59,8	16,2/ 65,4	17,1/ 200,4	6,9/ 492	30,8/ 78,5	21,2/ 685,6	24,3/ 53,2	27,4/ 57,5	30,2/ 64,5	16,2/ 574,1	27,7/ 57,5	22,4/ 111,8	34,3/ 436,7	14/ 188,1	11,8/ 116,1	1,2/ 119	26,2/ 1524	29,9/ 49,8	25,2/ 57,7
*Cicchitti et al. (1960)	20,2/ 58,9	29,9/ 62,5	15,3/ 69	22,1/ 216,2	6,9/ 495,9	34/ 85,9	24,9/ 779,6	22,1/ 57,1	33,3/ 61	32,7/ 69	16,8/ 459,8	31,2/ 60,3	26,2/ 117,4	32,7/ 496,1	10,3/ 200,4	10/ 124	1,2/ 1127	29,6/ 1634,1	28,7/ 53,2	24,6/ 60,7
*Owens (1961)	20,2/ 58,2	29,3/ 61,9	15,6/ 68,3	21,8/ 216,6	6,9/ 495,9	32,7/ 85,4	24/ 782,9	22,1/ 56,3	33/ 60,4	32,7/ 68,5	16,8/ 470,3	31,8/ 59,7	24,6/ 117,1	32,7/ 472,2	10,3/ 197,3	10,9/ 122	1,2/ 1133	28,7/ 1637,7	28,7/ 52,5	24,9/ 59,9
*Dukler et al. (1964)	23,7/ 48,8	33,3/ 41,2	20,9/ 60,3	49,8/ 160,4	8,1/ 348,5	41,4/ 46,8	38,3/ 673,7	24/ 47,1	46,7/ 36,8	42,1/ 45,6	15,6/ 364,2	42,7/ 38,5	43,3/ 75,4	43,9/ 255,8	16,5/ 125,5	15/ 75,5	1,9/ 846,7	44,2/ 1386,7	32,1/ 40,3	33/ 43,9
*Beattie e Whalley (1982)	29,3/ 46,9	38,6/ / 45,3	19,3/ 58,3	16,2/ 202,2	6,2/ 433,4	39,3/ 54,2	19,9/ 875,4	31,5/ 45,1	38,6/ 42,8	43/ 51,7	15,6/ 462,3	36,1/ 43,4	21,5/ 97,2	34,6/ 325,5	10,3/ 153,3	14,3/ 91,8	1,9/ 1049	28,3/ 1389,5	46,1/ 39,8	38,3/ 46
*Lin et al. (1991)	19,6/ 57,8	28,7/ 61,7	12,5/ 67,8	19,6/ 211,6	6,9/ 499,7	32,7/ 83,8	22,4/ 754,5	20,6/ 55,9	31,2/ 60	33,6/ 67,8	16,8/ 567,9	29,6/ 59,5	23,4/ 116,5	32,7/ 456,5	11,5/ 197,8	10/ 122,2	1,2/ 1232	26,2/ 1616	26,5/ 52,4	22,4/ 60,1
*Garcia et al. (2003)	25,9/ 48,5	38/ 39,9	21,5/ 60,1	53,9/ 156,1	8,1/ 339,7	45,8/ 45,1	47,7/ 659,2	26,5/ 46,8	49,5/ 35,5	43/ 44,4	16,2/ 341,5	45,5/ 37,4	48,6/ 72,2	47,7/ 237,1	17,1/ 120,7	15,3/ 72	1,9/ 819,9	49,8/ 1372,1	34,9/ 39,9	32,1/ 43,4
*Awad e Muzychka (2008)	21,2/ 56,5	27,4/ 60,5	15/ 66,6	19/ 203,9	6,9/ 493,5	32,7/ 80,6	22,4/ 710,4	21,8/ 54,6	29,9/ 58,4	33,3/ 65,6	16,8/ 583,2	28,7/ 58,2	22,1/ 113,4	34/ 445,1	12,5/ 192,4	10,3/ 119	1,2/ 1213	25,5/ 1559,6	28/ 51,2	23,1/ 58,9
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	22,7/ 52,4	31,8/ 52	17,4/ 63,2	20,9/ 201,8	7,8/ 418,3	34/ 63,5	25,9/ 806,4	23,1/ 50,6	33,3/ 48,3	35,8/ 58,3	14,3/ 500,2	33,6/ 49,2	25,5/ 101,5	31,5/ 377,3	17,1/ 165,9	13,7/ 99	1,9/ 1033	26,5/ 1519,4	34/ 45,2	27,1/ 51,3
Lockhart e Martinelli (1949)	22,4/ 54,2	15,9/ 56,4	19,3/ 64,9	23,1/ 188,8	1,9/ 444	26,2/ 63,5	29/ 683,6	24,3/ 52,2	28,7/ 52,7	24/ 59,8	23,1/ 484,9	21,2/ 54,1	34,3/ 100	43,3/ 389,6	19/ 176,5	8,7/ 107,7	0,6/ 1113	32,1/ 1732,8	24,9/ 48,5	18,4/ 55,8
Chisholm (1973)	29,6/ 51,1	31,5/ 61,3	18,1/ 63,1	13,7/ 310,6	4,7/ 532,4	33,3/ 106,6	19,3/ 1191,1	33,3/ 48,8	33/ 63,8	35,5/ 78,6	17,1/ 601,5	30,8/ 60,9	23,4/ 155,2	35,5/ 479,6	15/ 224,8	12,5/ 123	0,6/ 1248	25,9/ 2631,3	39,9/ 44,8	31,2/ 54
Grønnerud (1979)	14,3/ 59,2	18,4/ 52,6	12,8/ 68,1	57,9/ 91,9	11,8/ 269,8	19,6/ 52,6	55,5/ 421,7	15/ 57,8	20,2/ 49,4	21,5/ 52,4	17,8/ 264,5	19,6/ 51,1	43/ 53,3	23,1/ 248,1	11,5/ 105,6	14,6/ 75,6	3,4/ 667	27,1/ 700,2	18,1/ 53	19/ 55,1
Friedel (1979)	41,7/ 49,9	32,1/ 73,4	22,7/ 59,6	3,4/ 432,8	0/ 764,2	29,6/ 137,1	7,2/ 1522,4	44,2/ 48	29,6/ 81,5	28,3/ 101,4	15/ 638,7	29/ 75,4	15/ 216,3	22,4/ 529,3	42,4/ 275,7	30,2/ 139	0/ 1675	22,4/ 3733,1	42,1/ 54,5	33/ 62,3
Wambsganss et al. (1992)	40,5/ 48,8	48,3/ 47	16,8/ 63,2	10,9/ 183,5	0/ 493,8	51,7/ 49,1	17,1/ 511,5	44,5/ 46,5	49,8/ 45,6	53/ 44,4	19,9/ 407,9	48,6/ 46,1	30,5/ 82,6	52,3/ 378,2	26,8/ 153,6	6,9/ 101,1	0/ 1197	55,1/ 1004	46,7/ 41,8	41,7/ 48,5
Mishima et al. (1993)	32,4/ 45,3	48,6/ 39,1	11,8/ 59,7	19,6/ 226,4	0,9/ 437	56,4/ 60,7	25,9/ 805,7	35,5/ 42,9	54,2/ 35,1	58,3/ 51	22,1/ 385,1	41,1/ 36,1	44,2/ 101,9	59,2/ 328,7	23,1/ 166,3	10,3/ 88	0/ 1068	54,5/ 2215,3	48,6/ 35,2	39,9/ 41,6

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.15 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 45^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Wallis (1969)	Zuber e Findlay (1965)	Rouhani e Axelsson (1970)	Ishii (1977)	Woldesenayat e Ghajar (2007)	Lockhart e Martinelli (1949)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima e Hibiki (1996)	34/ 45	51,7/ 39,2	37,7/ 42,5	58,3/ 62,7	56,7/ 51,9	57,9/ 346,9	55,5/ 2318,4	39,9/ 108,9	13,4/ 59,7	19/ 239,3	0,3/ 456,6	20,2/ 847,8	58,6/ 36,3	21,5/ 405,3	53,6/ 36,6	23,7/ 174,3	11,5/ 91,6	0/ 1113,2	49,2/ 34,6	39,3/ 41,4
Lee e Lee (2001)	24/ 53	41,1/ 48,7	28,7/ 51,1	44,9/ 48,9	47,7/ 46,8	46,7/ 285,3	49,8/ 680,9	49,5/ 55,2	12,8/ 65,1	23,1/ 110,5	1,2/ 382,4	38,9/ 249,4	42,4/ 45,2	24/ 313,5	40,5/ 47	14,3/ 128,3	9,3/ 90,5	0/ 982,1	44,5/ 45,9	36,4/ 50,3
Yue et al. (2004)	23,7/ 102,1	16,5/ 135,6	20,9/ 103,8	11,5/ 170,3	6,9/ 159,2	6,5/ 885,2	5,9/ 3397,1	4,4/ 284	22,1/ 96,1	3,4/ 505,1	0/ 1029	2,8/ 1517	15,6/ 140	4/ 879,1	17,4/ 135	23,7/ 412,6	43,9/ 228,1	0/ 2473,7	23,7/ 117	22,4/ 123,9
English e Kandlikar (2006)	0,3/ 68,5	5,6/ 59,9	0,6/ 67,1	7,2/ 64,7	3,4/ 63,7	5,3/ 145	6,5/ 977,6	16,2/ 65,9	0/ 77,4	35,2/ 104,4	27,4/ 192,9	38,9/ 327,4	5/ 57,9	32,1/ 148,8	5,3/ 59,2	17,8/ 83	13,4/ 61,8	2,2/ 504,4	0,9/ 62,4	1,2/ 64,1
Ide et al. (2007)	19/ 117,8	16,5/ 148,7	16,8/ 120,1	15,6/ 168,9	13,7/ 160,2	11,8/ 811,3	6,9/ 2076,1	4,7/ 260,3	23,4/ 101,3	1,9/ 458	0/ 1118,9	0,9/ 1170	14,6/ 152,5	2,8/ 763,5	15,9/ 148,3	22,4/ 382,9	37,7/ 234,5	0/ 2579	16,8/ 134,2	18,1/ 140,4
Zhang et al. (2007)	18,7/ 49,5	35,5/ 40,9	20,2/ 47,4	47,7/ 55,1	36,8/ 48,9	58,3/ 244,1	55,1/ 1686,1	59,8/ 71,1	15,6/ 62,1	47,7/ 162,6	1,9/ 334,4	51,1/ 588,7	47/ 37	28/ 281,5	45,5/ 38,7	16,5/ 126,9	19/ 71	0,3/ 831,8	31,8/ 40,5	30,2/ 44,8
Chen et al. (2007)	37,7/ 48,4	36,1/ 49,4	40,8/ 47,3	40,5/ 60,8	47,4/ 54	40,8/ 340,7	42,1/ 1712,1	25,2/ 106,3	19/ 60,5	12,8/ 224,3	0,3/ 520,6	14,3/ 681,1	40,2/ 47,9	12,8/ 368	37,1/ 47,9	37,1/ 174,1	22,7/ 101,9	0/ 1275,3	37,7/ 46,2	33/ 51,8
Zhang et al. (2010)	31,8/ 45,5	48,3/ 39,2	35,2/ 43,1	55,1/ 59,9	57,3/ 50,5	59,5/ 318,2	55,5/ 2155,1	45,5/ 98	11,5/ 59,8	20,9/ 219	0,9/ 425,6	31,2/ 780,7	52,6/ 34,9	22,4/ 373,4	51,4/ 36,2	22,1/ 161,8	11,5/ 86	0/ 1041,8	48,3/ 35,6	39,9/ 41,8

Tabela 6.16 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão</div> <div>fração de vazio</div> <div>Método de</div> <div>Previsão</div> <div>perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghaajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*Mcadams et al. (1942)	26,9/ 51,7	28,6/ 52,7	17,3/ 63,4	19,9/ 140,7	8,6/ 798,1	28,2/ 57,7	24,9/ 174,8	27,2/ 50,5	27,2/ 49,8	31,9/ 55,9	15,3/ 403,2	25,9/ 50,8	21,6/ 127,4	32,2/ 332,3	23,3/ 129,9	26,2/ 51,2	0,7/ 2516,8	21,6/ 83,2	32,2/ 45,8	27,2/ 52,1
*Davidson et al. (1943)	21,2/ 58,5	28,6/ 59,9	13/ 69,3	24,6/ 160	8,6/ 843	32,2/ 69,2	24,3/ 205,4	21,6/ 56,8	29,9/ 56,9	31,9/ 64	15,9/ 401,2	27,9/ 57,9	22,6/ 147,1	34,9/ 425,7	24,3/ 156,8	30,2/ 58,9	0,7/ 2082,3	24,9/ 96,8	27,9/ 52,9	23,9/ 59,9
*Akers et al. (1959)	23,1/ 54,8	25,2/ 57,2	16,3/ 66,1	20,6/ 147,8	9/ 823,2	27,9/ 63,8	24,6/ 188,1	23,9/ 53,4	26,9/ 54,3	30,2/ 60,6	15,6/ 435,4	24,9/ 55,2	20,9/ 137,1	33,6/ 369,3	22,6/ 142	25,9/ 55,9	0,3/ 2726,9	22,6/ 90,3	30,6/ 49,3	25,2/ 56,4
*Cicchitti et al. (1960)	21,2/ 58,4	28,6/ 59,7	13/ 69	24,3/ 158,1	9/ 840	32,2/ 69	24,3/ 205,2	21,6/ 56,7	29,9/ 56,8	31,9/ 63,9	15/ 399,8	27,9/ 57,7	21,6/ 147,1	34,9/ 423,5	23,6/ 156,8	30,2/ 58,7	0,7/ 2079,1	24,6/ 96,8	27,9/ 52,8	23,9/ 59,7
*Owens (1961)	21,2/ 58,3	28,6/ 59,7	13/ 68,9	24,3/ 158,8	9/ 841,3	32,2/ 69,2	22,9/ 206,1	21,3/ 56,6	29,6/ 56,9	31,9/ 64	15/ 407,3	27,6/ 57,7	20,6/ 147,8	34,9/ 426	22,3/ 157,6	29,6/ 58,8	0,7/ 2125,9	24,3/ 97,2	28,2/ 52,7	24,3/ 59,7
*Dukler et al. (1964)	22,5/ 50,2	32,6/ 43	17,9/ 62,6	51,8/ 110	12,3/ 604,1	42,2/ 41,5	40,2/ 166	22,6/ 49,2	45,2/ 38,5	38,9/ 44,3	14/ 276,3	41,2/ 40,6	41,5/ 102,3	45,5/ 222,4	43,9/ 100,6	44,2/ 38,8	1,7/ 1682,1	44,9/ 64,6	29,9/ 42,6	32,2/ 44,8
*Beattie e Whalley (1982)	29,1/ 47,5	36,5/ 45,3	18,9/ 60,2	22,3/ 137	7,3/ 756,7	39,9/ 46	20,9/ 213,1	29,9/ 46,6	37,5/ 42,2	43,5/ 48,6	16,6/ 347	37,5/ 43,2	23,3/ 123	37,2/ 279,8	24,9/ 131,5	34,9/ 43,8	0,7/ 2124,6	29,6/ 80,2	40,9/ 41,2	35,9/ 45,9
*Lin et al. (1991)	19,9/ 57,4	27,6/ 59,3	12,3/ 68,4	22,6/ 155	9/ 837,4	31,2/ 67,7	24,6/ 199,8	19,9/ 56	28,2/ 56,2	30,9/ 63	15/ 450,4	26,9/ 57,2	22,6/ 143,7	35,9/ 391,4	24,3/ 152,2	28,9/ 57,9	0,7/ 2870,8	25,6/ 94,5	25,2/ 52,3	20,9/ 59,2
*Garcia et al. (2003)	25/ 50,2	32,6/ 41,8	18,9/ 62,7	54,8/ 106,6	12,3/ 593,1	43,9/ 40,1	48,8/ 160,8	24,9/ 49,2	44,5/ 37,6	41,2/ 43,4	13,6/ 257	39,9/ 39,7	46,5/ 98,5	47,2/ 205,7	49,5/ 96,6	44,5/ 37,9	2/ 1573,7	46,2/ 62,2	32,2/ 42,3	34,6/ 44,2
*Awad e Muzychka (2008)	21,2/ 56,5	25,6/ 58,7	14,6/ 67,5	21,9/ 150,3	9/ 828	29,6/ 66,1	23,6/ 191,8	21,9/ 55,1	26,6/ 55,6	29,6/ 62	15,3/ 445,3	26,6/ 56,6	21,9/ 139	35,5/ 381,7	24,3/ 146	26,9/ 57,2	0,7/ 2804,7	25,2/ 91,8	27,2/ 51,3	21,6/ 58,3
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	20,9/ 53,3	30,9/ 51,6	14,6/ 65,1	25,2/ 142,5	12/ 697,1	34,2/ 53,6	26,9/ 209,4	20,9/ 52,1	32,9/ 47,2	34,6/ 55,3	14/ 389,1	31,9/ 48,9	23,9/ 132,2	33,2/ 327,6	25,9/ 134,9	32,9/ 48,4	1,3/ 2376	25,6/ 84,9	33,2/ 46,6	28,9/ 51,5
Lockhart e Martinelli (1949)	21,5/ 55	15/ 55,6	15,6/ 66,3	28,9/ 140,4	2/ 652,1	27,2/ 54,9	32,6/ 189,4	21,9/ 53,3	30,9/ 52	24,3/ 55,5	22,6/ 378,6	19,6/ 53,7	34,6/ 127,4	39,2/ 316,6	36,2/ 117,3	27,9/ 52,4	0/ 2399,4	31,2/ 83,2	24,3/ 49,3	16,3/ 55,7
Chisholm (1973)	26,9/ 51,8	31,6/ 57,3	16,3/ 64,4	19,3/ 226,9	6,6/ 888,2	33,9/ 81,2	21,9/ 299,9	29,2/ 49,6	29,9/ 57,4	35,2/ 72,9	18,3/ 497,1	29,6/ 56,6	24,3/ 208,1	32,2/ 467,1	24,3/ 227,5	23,9/ 62,6	0/ 2753,7	23,9/ 126,9	39,2/ 45	31,6/ 54,3
Grönnerud (1979)	13,6/ 59,9	17,3/ 54,5	11,6/ 69,7	58,1/ 65,4	14,6/ 470,3	18,9/ 50,6	51,8/ 103,4	13,3/ 59,2	19,9/ 51,3	18,9/ 53	17,3/ 226,7	18,6/ 52,9	43,2/ 64,8	23,3/ 219,7	43,2/ 60,1	20,3/ 51,8	5/ 1191	28,2/ 55,3	16,6/ 54,3	18,9/ 55,3
Friedel (1979)	40,8/ 50,6	31,6/ 67,6	21,6/ 60,2	3,7/ 330,7	0,3/ 1395	29,9/ 104	8/ 403,7	43,9/ 47,8	28,6/ 73,1	28,9/ 92,9	17,9/ 551	30,6/ 69,6	17,9/ 285,4	26,2/ 527,8	21,3/ 300,8	25,9/ 78,8	0/ 2809,5	24,9/ 166,5	40,2/ 53,6	32,2/ 64,8
Wambsganss et al. (1992)	40,8/ 48,6	46,5/ 46,5	14/ 64	8,3/ 145,8	1/ 899,8	54,8/ 44	22,3/ 170,1	43,5/ 46,7	50,2/ 45,7	55,8/ 42,3	21,9/ 333,8	46,8/ 46,2	31,6/ 102,5	51,2/ 307,4	32,9/ 95,4	48,5/ 46,2	0/ 1960,1	50,5/ 64,6	49,2/ 41,5	43,5/ 48,3
Mishima et al. (1993)	29,4/ 45,7	48,2/ 38,5	11/ 60,9	17,9/ 170,6	0,3/ 783	57,8/ 45,9	29,6/ 208,6	33,6/ 43,6	53,5/ 33,3	61,1/ 47,4	23,9/ 321,4	50,8/ 35,6	44,5/ 142,8	64,5/ 303,8	46,5/ 142,8	51,5/ 35,5	0/ 1833,9	55,8/ 80	48,5/ 36,1	39,9/ 40,9

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.16 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 60° e $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima e Hibiki (1996)	32,9/ 45,4	51,5/ 38,3	12,6/ 60,9	15,3/ 180,9	0,3/ 816,9	58,8/ 46,9	24,6/ 221,3	36,2/ 43,2	57,5/ 34,2	60,5/ 47,9	23,3/ 337,8	52,2/ 35,6	39,9/ 151,4	63,5/ 320,4	44,9/ 151,5	51,5/ 36,5	0/ 1924,5	55,1/ 84,7	49,5/ 35,3	40,2/ 40,7
Lee e Lee (2001)	23,1/ 52,2	40,2/ 48,4	11,3/ 65,5	20,9/ 98,3	1/ 710,2	45,2/ 44,1	37,5/ 95,2	28,2/ 50,9	42,5/ 44,8	47,2/ 45,3	24,9/ 269,1	39,9/ 46,7	47,8/ 68,4	53,5/ 231,4	51,8/ 63,9	39,2/ 45,7	0/ 1535,6	50,2/ 49,8	42,5/ 45,6	39,2/ 48,9
Yue et al. (2004)	20,9/ 103,3	40,2/ 48,4	22,3/ 95,2	2,7/ 415	0/ 1919,4	45,2/ 44,1	2,7/ 501,1	28,2/ 50,9	17,9/ 137,1	47,2/ 45,3	4,3/ 755,6	16,9/ 133,3	4/ 350,1	53,5/ 231,4	5,3/ 342	19,9/ 135,1	0/ 4272	7/ 227,9	21,9/ 117,7	20,6/ 128,3
English e Kandlikar (2006)	0/ 68,8	15,9/ 133,6	0/ 78	36,5/ 79,5	30,9/ 361,9	15,3/ 153	36,2/ 95,9	18,9/ 103,6	3/ 58,5	9,3/ 152,4	29,6/ 130	3/ 60	17,9/ 82,1	8,3/ 754,7	14,3/ 82,2	2/ 59	3/ 703,9	5/ 69,8	0/ 62,9	1,3/ 63,6
Ide et al. (2007)	17,1/ 119,6	4,7/ 60,5	21,6/ 101,5	2,3/ 391	0,3/ 2151,3	6/ 58,9	1,7/ 428	0,3/ 67,6	16,9/ 153,4	5/ 63	3/ 700,5	17,6/ 149,5	6,6/ 303,6	3,7/ 144,5	8/ 301,7	16,6/ 149	0/ 3790,3	9,3/ 215,1	15,9/ 137,1	17,3/ 146,6
Zhang et al. (2007)	18,7/ 49,9	16,6/ 149,6	15,3/ 63,5	49,2/ 119,4	1,3/ 606,9	15,6/ 160,8	52,8/ 146,4	16,6/ 121,2	46,2/ 37	11,3/ 160,6	28,6/ 237	42,9/ 39,4	57,8/ 103	11,6/ 684,4	58,1/ 102,8	42,9/ 38	0/ 1361,8	54,8/ 65,4	31,6/ 41,5	34,6/ 44,4
Chen et al. (2007)	40,8/ 47,8	34,6/ 41,6	18,3/ 61,3	10,6/ 181,3	0,3/ 1007,7	46,2/ 44,7	12/ 209,9	19,6/ 48,4	38,9/ 49	33,2/ 47,1	15,6/ 319,4	35,2/ 49,2	22,6/ 140,4	60,8/ 229,4	26,9/ 133,7	41,5/ 47,3	0/ 1867,8	36,5/ 83,2	41,2/ 47	33,9/ 52,8
Zhang et al. (2010)	29,7/ 45,9	36,9/ 50,2	11/ 61	20,3/ 164,9	0,7/ 763,9	40,2/ 52,8	33,6/ 201,5	39,9/ 47,5	52,2/ 33,3	48,2/ 51,8	24,9/ 312,1	49,5/ 35,9	44,5/ 138,1	33,6/ 294,8	47,5/ 138	50,2/ 35,4	0/ 1782,7	57,1/ 77,5	48,8/ 36,5	40,9/ 41,1

Tabela 6.17 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 90° ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão</div> <div>fração de vazio</div> <div>Método de</div> <div>Previsão</div> <div>perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*Mcadams et al. (1942)	22,3/ 53,3	31,8/ 53,7	15,4/ 64,6	9,6/ 286,8	3,1/ 636,2	38,4/ 66,7	20,5/ 145,8	25/ 51,3	35,6/ 49,9	40,4/ 65,3	19,2/ 683,6	31,5/ 51,1	29,8/ 127,8	41,1/ 440,1	32,5/ 89,4	31,8/ 55,3	0/ 1476,8	31,8/ 65,6	36/ 46,3	28,1/ 52,8
*Davidson et al. (1943)	18,8/ 59,6	31,8/ 61,9	14,4/ 70,5	12,7/ 335,2	2,7/ 674	37,7/ 82,7	21,9/ 173,1	21,9/ 57,6	35,3/ 59,1	37,3/ 78,4	19,2/ 723,5	31,8/ 59,7	31,2/ 154,6	39,7/ 564,5	32,5/ 107,8	30,1/ 68,1	0/ 1616	31,8/ 79	33,6/ 53	26,7/ 60,6
*Akers et al. (1959)	20,5/ 56,4	31,2/ 58,1	15,1/ 67,4	10,3/ 314,8	3,1/ 657,3	38,7/ 74	19,9/ 158	22,3/ 54,4	35,3/ 54,6	40,4/ 71,2	18,8/ 723,1	31,8/ 55,5	29,8/ 139,9	39,7/ 491	31,8/ 98,1	29,8/ 61	0/ 1544,7	31,2/ 72,1	33,6/ 49,8	26,4/ 57
*Cicchitti et al. (1960)	17,8/ 60,2	29,5/ 62,6	14/ 70,8	15,1/ 328,6	3,1/ 668,9	34,6/ 83,4	25,3/ 169	20,9/ 58,2	31,8/ 59,7	33,9/ 79,2	19,5/ 530,1	28,8/ 60,4	34,2/ 152,3	38,4/ 561,8	34,9/ 106,4	27,1/ 68,7	0/ 1456,8	30,1/ 79,2	31,2/ 53,9	24,3/ 61,4
*Owens (1961)	16,8/ 60,9	30,1/ 63,3	13,4/ 71,5	15,4/ 331	3,1/ 668,5	34,9/ 84,2	25,7/ 169,9	19,9/ 58,9	32,2/ 60,3	33,6/ 80	19,5/ 525,2	29,5/ 61	34,9/ 153	38,7/ 567,9	34,9/ 107	28,1/ 69,4	0/ 1462,3	30,8/ 79,8	30,5/ 54,5	22,9/ 62
*Dukler et al. (1964)	19,2/ 51,7	28,4/ 43,6	16,4/ 63,3	50/ 236,4	3,1/ 505,9	33,6/ 49,1	51,4/ 131,1	19,9/ 49,9	36,6/ 39,1	31,2/ 55,8	22,6/ 473,7	33,9/ 41,1	56,2/ 104,1	42,8/ 294,7	56,5/ 63,8	35,3/ 42,2	0/ 1129,2	45,5/ 51	28,1/ 43,2	29,8/ 45,8
*Beattie e Whalley (1982)	26/ 48,9	39,7/ 45,1	17,1/ 61	13/ 266,8	2,7/ 609,7	45,9/ 52,1	20,2/ 161,2	30,1/ 46,9	44,5/ 42,2	48,6/ 62,3	19,9/ 607,6	42,5/ 43,2	31,8/ 120,4	43,2/ 368,2	37,3/ 85,8	37,3/ 45,4	0/ 1258,6	39,4/ 59	44,5/ 40,9	35,6/ 46,1
*Lin et al. (1991)	16,4/ 58,9	31,5/ 60,5	11,3/ 69,7	13,7/ 315,3	2,7/ 666,8	37/ 79,8	22,9/ 165,6	18,8/ 56,9	33,2/ 57,4	37,7/ 76,3	19,2/ 736,2	30,5/ 58,1	31,8/ 148,8	38,7/ 515,7	32,2/ 104	28,8/ 65,5	0/ 1587,6	30,1/ 76,8	31,5/ 52,5	25/ 59,9
*Garcia et al. (2003)	19,5/ 51,7	29,8/ 42,4	16,4/ 63,4	53,4/ 230	3,1/ 496,7	34,6/ 47,3	55,8/ 126,5	20,2/ 49,9	38/ 38	32,2/ 54,4	23,3/ 453,7	34,2/ 40,1	59,2/ 100,2	42,5/ 272,7	59,6/ 61,2	36,6/ 41	0/ 1101,6	45,9/ 49,1	28,1/ 43	29,5/ 45,1
*Awad e Muzychka (2008)	18,8/ 57,9	31,8/ 59	13,4/ 68,8	13/ 303	3,1/ 661,3	37,3/ 76,4	21,9/ 160,6	20,9/ 55,9	34,2/ 55,8	39/ 73,2	18,8/ 733,1	31,8/ 56,7	31,5/ 143	38/ 503,7	32,5/ 100,2	29,8/ 62,8	0/ 1562,5	30,1/ 73,8	32,5/ 51,3	25,3/ 58,5
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	18,5/ 55	28,8/ 53,1	13,4/ 66,2	24,3/ 295	3,1/ 574,7	32,5/ 63,6	30,5/ 167,6	19,2/ 53,1	30,8/ 49,1	29,5/ 69	21,2/ 614,2	28,4/ 50,3	38/ 136,9	40,1/ 432,6	41,8/ 89,2	29,5/ 54,4	0/ 1339,5	34,2/ 66,6	28,4/ 47,4	25,7/ 52,6
Lockhart e Martinelli (1949)	20,2/ 55,3	24,3/ 55	15,1/ 66,8	21,2/ 246,3	0/ 628,9	28,4/ 60,2	31,5/ 161,1	22,9/ 53,1	26,7/ 50,9	31,2/ 64,5	25,7/ 555,5	22,6/ 52,6	41,1/ 127,3	37/ 440,6	42,5/ 81,8	18,8/ 53,6	0/ 1509	32,9/ 66,2	30,1/ 48,5	22,6/ 55,2
Chisholm (1973)	25,7/ 52,7	36/ 58,5	14,7/ 65,4	9,2/ 483,8	0,7/ 704,7	40,8/ 97,7	18,5/ 236,2	30,1/ 50,3	37,3/ 57,7	43,2/ 91,4	20,5/ 697,9	34,6/ 57,1	26,7/ 212,6	45,9/ 536,7	31,5/ 138,5	33,2/ 72,7	0/ 1494,2	38,7/ 91,1	42,5/ 44,5	34,2/ 53
Grønnerud (1979)	13/ 61,6	15,1/ 55,6	11,6/ 70,7	54,1/ 113,5	5,1/ 413,5	15,8/ 55,5	57,5/ 87,3	13/ 60,1	17,8/ 52,5	18,5/ 57,8	20,5/ 288,5	16,4/ 54,1	40,1/ 71,3	18,5/ 303,1	35,3/ 55,4	18,2/ 53,1	0,7/ 855,8	21,6/ 52,4	15,8/ 55,4	16,4/ 56,7
Friedel (1979)	40,8/ 49,5	33,2/ 69,2	20,5/ 61,6	1,7/ 644,2	0/ 1075,5	32,5/ 123,4	5,8/ 332,8	44,5/ 48	34,9/ 73,4	12/ 115,3	32,5/ 808,8	32,5/ 69,6	11,6/ 294,2	21,9/ 622,3	13/ 196,9	31,5/ 89,6	0/ 2100,9	27,4/ 123,2	38,7/ 53,6	34,2/ 62,8
Wambsganss et al. (1992)	36,3/ 50,4	45,2/ 46,4	12/ 65,3	13/ 255,2	0/ 770,5	48,3/ 47,5	15,8/ 144,7	41,1/ 47,9	47,9/ 43,3	50/ 49,3	18,2/ 516,9	45,5/ 44,6	33,2/ 100,4	56,2/ 426,3	41,1/ 70,9	48,6/ 44,3	0/ 1584,8	57,9/ 49,5	48,6/ 42,3	43,5/ 48,2
Mishima et al. (1993)	31,5/ 47,7	49,3/ 40,5	11/ 62,4	24,3/ 332,1	0/ 680,9	52,4/ 57,5	26,7/ 173,3	35,6/ 45	50/ 36,2	56,8/ 61,3	22,6/ 462	49,7/ 38,1	52,7/ 140,7	56,2/ 382	58,6/ 87,2	47,6/ 43,6	0/ 1370,8	56,2/ 56,9	49/ 37,6	41,1/ 42,8

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.17 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de 90° (ξ [%]/ η [%]).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Zivi (1964)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Wallis (1969)	Smith (1969)	Rouhani e Axelsson (1970)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Zhao et al. (2000)	Waldesemayat e Ghaajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima e Hibiki (1996)	33,6/ 47,3	47,6/ 40,4	11,3/ 62,4	21,6/ 349,7	0/ 707,6	52,1/ 58,9	21,6/ 183,8	37/ 44,5	50,7/ 36,1	56,2/ 62,6	20,2/ 486,3	49,3/ 37,9	47,3/ 149,7	58,6/ 401,8	55,8/ 93,3	49,3/ 44,1	0/ 1429,7	57,9/ 59,1	49,3/ 37	41,8/ 42,4
Lee e Lee (2001)	19,5/ 55,3	37,3/ 51,1	10,6/ 67,7	25/ 177,2	0/ 623,1	41,8/ 50,9	36/ 87	23,3/ 53,1	43,8/ 47,7	44,2/ 51,6	26/ 380,7	39/ 49,6	53,4/ 64,2	46,2/ 344,7	53,1/ 51,1	39,4/ 49,2	0/ 1284,4	48,6/ 47,1	40,4/ 48	34,9/ 51,9
Yue et al. (2004)	19,5/ 55,3	37,3/ 51,1	20,5/ 95,7	0/ 676,4	0/ 1554,7	41,8/ 50,9	2,7/ 433	23,3/ 53,1	20,5/ 136,4	44,2/ 51,6	2,7/ 1092,9	21,6/ 132	2,4/ 355,4	46,2/ 344,7	3,4/ 262,9	20,2/ 139,8	0/ 3373,4	48,6/ 47,1	22,9/ 115,6	22,6/ 126,2
English e Kandlikar (2006)	24,7/ 101,7	18,5/ 133,4	0,7/ 79	27,7/ 149,6	15,8/ 349	19,9/ 162,3	34,6/ 86,9	22,6/ 103,9	5,1/ 59,3	16,1/ 169,8	29,8/ 178,3	4,5/ 60,8	18,2/ 82,6	8,2/ 1071	14,4/ 64,8	5,8/ 60,9	0/ 637,4	6,8/ 188	1,4/ 63,9	3,8/ 64,6
Ide et al. (2007)	0,7/ 70	5,5/ 61,1	21,9/ 102,2	2,7/ 579,6	0/ 1698,3	6,8/ 64,9	0,7/ 383	1/ 68,5	16,1/ 154,9	4,1/ 69,2	2,7/ 948,7	16,8/ 150,9	5,1/ 314,4	4,8/ 169,2	7,2/ 248,6	18,2/ 153,8	0/ 3475	7,2/ 62,6	16,1/ 138,5	16,8/ 148,2
Zhang et al. (2007)	16,1/ 120,4	16,4/ 152,2	14/ 65,3	40,1/ 244,1	0/ 541,9	16,4/ 171,4	56,8/ 122	15,8/ 123,6	40,1/ 39,2	16,4/ 172,4	31,8/ 337,5	32,5/ 41,2	63/ 101,1	13,7/ 1001,5	62,7/ 64,5	30,8/ 44,1	0/ 1064,1	14,4/ 189,1	28,1/ 43,3	31,8/ 46,3
Chen et al. (2007)	17,5/ 52,4	28,1/ 43,1	18,8/ 63,6	14/ 313,3	0/ 862,2	35,3/ 54,1	14,7/ 183,6	20,5/ 50,2	34,2/ 50,1	36/ 57,7	8,2/ 471,4	35,6/ 50,4	24,3/ 140,1	51,4/ 287,1	28,4/ 97,2	38,7/ 50,5	0/ 1721,6	54,1/ 52	36/ 49,8	32,5/ 55,4
Zhang et al. (2010)	38/ 50,6	34,6/ 52,3	11/ 62,5	24,7/ 322,1	0/ 665,7	36,3/ 61,7	33,2/ 167,3	39/ 49,9	51/ 36,3	46,6/ 63,1	23,6/ 448,1	51,4/ 38,3	55,1/ 135,6	28,4/ 430,6	59,6/ 83,8	47,9/ 43,5	0/ 1337,3	40,1/ 65,9	46,2/ 38	40,1/ 43

Na Fig. 6.55 ilustra-se uma comparação entre os gradientes de pressão previstos segundo o método de Mishima et al. (1993) e os resultados experimentais estimados com base na previsão da fração de vazio superficial utilizando o método de Barcozy (1966).

Figura 6.55 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado segundo ângulo de 30° e $\theta = 0^\circ$. Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Barcozy (1966).

A combinação destes métodos para escoamentos inclinados resultam em valores similares de ξ e η aos obtidos para o escoamento horizontal considerando apenas o método para previsão da parcela da perda de pressão devido ao atrito. Analogamente ao canal horizontal, previsões significativamente elevadas foram proporcionadas pelo método de Mishima et al. (1993) para valores elevados de j_G .

Para canal inclinado segundo ângulo 60° , segundo indicado nas Tabs. 6.14 a 6.16 observaram-se resultados similares ao verificado para $\phi = 30^\circ$ com os métodos de Wambsganss et al. (1992), Mishima et al. (1993), Mishima e Hibiki (1996) e Zhang et al. (2010) proporcionando previsões satisfatórias. Para esta condição, também se observa que o método de Grönnerud (1979) proporciona valores de ξ e η satisfatórias.

A Fig. 6.56 apresenta comparação entre os resultados experimentais e os previstos segundo o método de Mishima et al. (1993), estimando a fração de vazio superficial segundo o método de Smith (1969). Observam-se resultados similares aos para canal inclinado em 30° . Também é verificada que uma parcela dos resultados é sobre-estimada.

Figura 6.56 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado 60° para $\theta = 0^\circ$. Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Smith (1969).

A Fig. 6.57 apresenta-se uma comparação entre os resultados experimentais obtidos em canal vertical e os gradientes de pressão previstos segundo o método de Mishima et al. (1993), estimando a fração de vazio superficial segundo o método de Rouhani e Axelsson (1970).

Figura 6.57 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado 90° . Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Rouhani e Axelsson (1970).

Observa-se nesta figura comportamento similar ao observado em canais inclinados 30° e 60° . Vale destacar que a partir dos resultados apresentados na Tab. 6.17 se observa que o método de Friedel (1979) proporciona resultados satisfatórios para escoamento vertical ascendente.

Canais Inclinados $\phi < 0^\circ$

Este item compara resultados experimentais com 25 métodos de previsão de perda de pressão por atrito, sendo o método de Friedel (1985) o único desenvolvido para escoamento descendente. Para a estimativa da parcela gravitacional considerou-se 18 métodos de previsão de fração de vazio superficial, entre este o método de Usui e Sato (1989) o único para escoamento descendente. Os resultados desta análise encontram-se nas Tabs. 6.18 a 6.22 dados em termos dos parâmetros ξ e η . Nelas também combinações de métodos que proporcina melhores previsões encontram-se destacadas em negrito.

A partir destas tabelas, observou-se que de maneira geral os métodos previsão não proporcionaram resultados satisfatórios de ξ e η , distinto que em canal horizontal e inclinados com $\phi > 0^\circ$. A Fig. 6.58 ilustra comparação entre os resultados experimentais obtidos escoamento vertical descendente e os gradiente de pressão previstos segundo o método de Friedel (1985), estimando a fração de vazio superficial segundo o método de Turner e Wallis (1965).

Figura 6.58 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado -90° . Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Turner e Wallis (1965).

Nesta figura, similar ao observado para escoamentos horizontais e inclinados ascendentes, verifica-se que uma parcela significativa de dados experimentais é subestimada.

Tabela 6.18 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -90° ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoi et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*Mcadams et al. (1942)	25,8/ 141,4	5/ 489,7	25,1/ 317,4	20,4/ 67,3	5,7/ 639,9	25,4/ 212,3	7/ 422,2	25,1/ 193,1	7/ 1985,5	21,1/ 507,5	19,1/ 191,1	19,7/ 205,1	4,7/ 408,8	8/ 624,4	19,1/ 60,3	5/ 291,2	4,7/ 1001,6	0,7/ 887,6
*Davidson et al. (1943)	34,8/ 145,3	10,4/ 506,6	24,4/ 344,7	18,7/ 74,1	14,4/ 656,3	24,1/ 229,4	15,1/ 444,7	20,1/ 202,4	14,4/ 2037,1	19,1/ 525,8	14,7/ 198,8	16,7/ 221,9	12,4/ 430,6	12,4/ 650,3	18,1/ 64,6	7,7/ 315,3	2/ 1047,3	0,3/ 965,2
*Akers et al. (1959)	23,4/ 146	8,7/ 500	24,1/ 348,6	21,4/ 71,1	11,4/ 651,9	24,7/ 225,8	9,7/ 438,3	23,7/ 198,5	9,7/ 2016,5	20,1/ 520,2	15,7/ 195,7	18,4/ 217	7,7/ 424,9	10/ 638,2	19,1/ 62,5	8,7/ 307,9	3,7/ 989,5	0,3/ 976,2
*Cicchitti et al. (1960)	36,1/ 144,7	10,4/ 503,8	24,4/ 342,7	19,7/ 73,7	14,4/ 653,8	23,7/ 227,9	15,4/ 442,1	20,7/ 202,1	14,4/ 2034,3	18,7/ 524,3	15,7/ 14/ 199	16,4/ 220,3	12,7/ 428	12,4/ 648,5	17,7/ 64,8	7,7/ 310,2	2/ 1041,7	0,3/ 960,4
*Owens (1961)	39,5/ 144,4	10,4/ 504,4	24,4/ 354,8	20,1/ 73,3	15,1/ 654,2	23,7/ 228,8	15,1/ 444,5	20,7/ 201,7	14,4/ 2036,4	18,1/ 524,8	15,1/ 198,6	16,4/ 221,1	12,7/ 430,1	13/ 649,6	17,7/ 64,4	7,4/ 312,7	2/ 1066,6	0,3/ 996,9
*Dukler et al. (1964)	29,1/ 123,5	7/ 446,5	23,1/ 228,7	18,4/ 62,8	12,7/ 549	27,1/ 176,2	15,4/ 339,7	29,1/ 178,8	11,7/ 1721,1	26,4/ 449,7	30,1/ 169,8	28,4/ 162,1	14,4/ 329,3	14/ 537,4	14,4/ 61,7	6/ 228,2	3/ 696,6	1/ 627,9
*Beattie e Whalley (1982)	26,1/ 135,8	5,4/ 462	26,1/ 273,2	22,4/ 64,3	9,7/ 600,7	24,1/ 191,3	8,7/ 376	23,7/ 193	8,4/ 1312,4	21,7/ 508,4	24,1/ 169,5	22,4/ 187,7	8,4/ 377	7,4/ 585,2	19,7/ 59,9	5,4/ 265,7	2,3/ 849,1	1/ 773
*Lin et al. (1991)	28,1/ 144,8	10,4/ 500,7	23,7/ 347,9	19,1/ 73,2	14,7/ 651,9	24,7/ 225,2	13,4/ 436,3	20,4/ 201,5	14,7/ 2027,6	19,7/ 522,1	15,4/ 197,6	17,1/ 217,7	12,7/ 423,3	11,4/ 642,5	18,7/ 64,1	9/ 306,2	3/ 1044,5	0,3/ 1007,4
*Garcia et al. (2003)	27,8/ 123,6	8/ 439,6	23,4/ 209,1	18,1/ 62,2	13,4/ 543	26,8/ 170,8	15,4/ 330,5	28,8/ 178,3	12/ 1706,9	27,1/ 444,4	29,8/ 169,7	29,4/ 156,8	14,7/ 320,3	15,7/ 531,9	15,4/ 61,8	6/ 218,8	3,3/ 649,5	1/ 574,7
*Awad e Muzychka (2008)	23,7/ 144,7	10,4/ 496,3	24,4/ 344,9	20,7/ 72,4	12,7/ 649,5	25,1/ 222,9	11/ 433,4	21,7/ 199,9	12,7/ 2015,7	20,1/ 519,5	14/ 196,6	17,7/ 215,5	8,7/ 420,4	11/ 637,8	18,7/ 63,7	9,7/ 302,7	3,7/ 1008,9	0,3/ 991,3
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	28,4/ 127	5,7/ 491,2	24,7/ 323,9	17,1/ 68,2	10/ 586	24,1/ 206,6	12/ 393,7	23,4/ 183,3	9/ 1803,5	23,4/ 478,1	29,1/ 175,2	24,7/ 192,9	10,7/ 381,1	8,7/ 572,5	16,7/ 62,2	5,4/ 285,8	2,3/ 975,9	0,3/ 905,1
Lockhart e Martinelli (1949)	22,7/ 157,5	6,4/ 559,1	16,1/ 324,8	19,4/ 71,8	12/ 684	17,7/ 237,7	14/ 437,2	19,7/ 216,2	10/ 2085,1	17,7/ 563	28,8/ 207,6	19,1/ 219,1	13,7/ 418,2	12,4/ 662	18,7/ 63,6	5,7/ 294,4	3,3/ 960,7	1,7/ 844,6
Chisholm (1973)	18,7/ 169,6	2,3/ 613,4	27,4/ 420,3	24,1/ 69,9	9,4/ 722,6	26,4/ 257,2	6,4/ 513,3	24,7/ 210	4,3/ 2356,1	19,4/ 564,6	24,4/ 214,7	19,7/ 243,5	10,7/ 489,6	6,7/ 733	21,1/ 60,3	2,3/ 381,4	1,3/ 1405,5	0/ 1284,9
Grönnerud (1979)	31,8/ 105,6	16,4/ 331,2	17,4/ 197,3	11,7/ 70,7	21,4/ 472,4	20,7/ 158,7	21,1/ 276,5	16,4/ 170,1	18,7/ 1374	21,7/ 409,1	25,8/ 156,1	21,7/ 148,3	19,1/ 266,8	26,8/ 459	10,4/ 69,5	9/ 168,1	16,1/ 468,7	7,7/ 409,6
Friedel (1979)	12,7/ 295,6	3,3/ 900,8	16,7/ 418,8	27,4/ 75,8	5/ 1099,6	14,7/ 340,4	2,3/ 724,7	17,4/ 314,2	3/ 3773,7	18,4/ 814,6	16,4/ 341,3	19,7/ 325,7	3,3/ 690,9	2,7/ 1114,2	28,8/ 58,5	3,3/ 474,5	2,3/ 1474,6	0/ 1270,8
Friedel (1985)	18,4/ 285,8	4/ 856,9	17,7/ 325,3	30,8/ 66,6	7/ 1087	15,7/ 312,2	5,4/ 672	17,1/ 314,8	4,7/ 3729,6	17,7/ 813,7	16,4/ 341,3	21,1/ 293,4	6,7/ 634,5	2,7/ 1114,2	30,4/ 53,4	3,7/ 399,6	3/ 1160,5	0/ 972,5
Wambsganss et al. (1992)	12,7/ 218	6,4/ 639	28,1/ 295,7	24,1/ 76	8/ 899,3	18,1/ 262	10/ 530,1	23,4/ 272,9	9,7/ 2909,6	14,7/ 708,8	13,4/ 270	14,7/ 253,5	10,4/ 506,8	8,7/ 875,5	18,1/ 65,7	8/ 290,8	5/ 739,5	3,3/ 680,7

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.18 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -90° ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima et al. (1993)	22,4/ 187,9	8,7/ 605,7	30,4/ 288,5	19,1/ 69	16,1/ 798,7	30,4/ 244,4	15,4/ 482,6	23,7/ 246,3	12/ 2599	21,7/ 639,2	23,4/ 248,3	24,7/ 225,4	14,4/ 455,8	17,7/ 792,6	18,1/ 61,8	7/ 286,1	1,3/ 840,2	0,3/ 773,5
Mishima e Hibiki (1996)	22,4/ 196,1	7,4/ 630,5	28,8/ 301,1	20,4/ 69,8	14,7/ 826,5	27,8/ 253,3	13,7/ 502,3	24,4/ 252,9	11,4/ 2697,8	22,7/ 658,3	23,1/ 256,4	24,1/ 234	15,1/ 474,3	13/ 820,5	18,4/ 61,8	7/ 299,7	1,3/ 881,8	0/ 811,2
Lee e Lee (2001)	16,1/ 177,5	5,7/ 493,9	24,4/ 257,1	16,4/ 73,2	6/ 747,7	14,4/ 516,8	4,3/ 1040,5	10,4/ 502,2	3,7/ 5012,2	14,7/ 1306,7	11/ 507,2	11,4/ 505,7	5,4/ 414	8/ 729,8	19,7/ 99,1	4,3/ 624,4	5/ 566,3	6,4/ 570,1
Yue et al. (2004)	13/ 450,6	3,3/ 1268	13,7/ 612	16,7/ 133,6	5/ 1669,5	17,4/ 154,4	28,4/ 260,4	9/ 183,8	31,1/ 1391,7	18,1/ 420,1	11/ 173	17,1/ 140,7	5,4/ 992,8	2,7/ 1632,7	5,7/ 75,1	22,1/ 132,6	1,7/ 1665,9	0/ 1488,4
English e Kandlikar (2006)	19,4/ 116,2	31,8/ 313,3	14,7/ 152,1	9/ 74	34,8/ 473,9	7,7/ 537,2	8,4/ 1077	8,4/ 574,7	5,7/ 4535,2	12/ 1573,7	14,4/ 569,4	13,4/ 546,8	27,4/ 245,4	36,1/ 475,9	17,1/ 109,6	4,3/ 581,5	29,4/ 328,7	29,4/ 306,5
Ide et al. (2007)	17,1/ 497,6	4/ 1210,2	10,4/ 589,6	15,7/ 147	8,7/ 1849,1	23,1/ 201,5	21,1/ 382,2	23,1/ 214,8	16,1/ 2085,2	22,1/ 541,4	29,4/ 209,6	25,4/ 183,7	9,4/ 1009	7/ 1811,8	16,1/ 64,2	14,4/ 216,5	0,7/ 1530,3	0,3/ 1307,4
Zhang et al. (2007)	28,4/ 149,7	16,4/ 477,1	28,1/ 225,9	17,1/ 66,9	17,4/ 656,2	16,4/ 283,5	15,1/ 569,3	18,1/ 313,4	12,7/ 2864,1	13/ 826,1	13,4/ 303	16,1/ 273,8	18,4/ 361,2	23,1/ 649,7	20,7/ 66,3	8,7/ 299,7	5/ 623,1	0,7/ 576,2
Chen et al. (2007)	16,7/ 246,2	10,7/ 694,3	22,1/ 286,5	22,4/ 78	15,1/ 1004,6	31,1/ 239,3	16,1/ 471	23,4/ 242,5	12/ 2539,9	22,7/ 628	24,1/ 243,6	24,7/ 220,5	14,7/ 537,9	20,1/ 986,5	17,7/ 61,9	7,4/ 278,2	2,7/ 759,8	1/ 668,7
Zhang et al. (2010)	21,4/ 183,2	10/ 591,1	31,8/ 281,3	18,7/ 68,6	17,4/ 782,3	14,4/ 516,8	4,3/ 1040,5	10,4/ 502,2	3,7/ 5012,2	14,7/ 1306,7	11/ 507,2	11,4/ 505,7	15,4/ 444,9	19,1/ 776,1	19,7/ 99,1	4,3/ 624,4	1,3/ 816	0,3/ 751,5

Tabela 6.19 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -60° para $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoi et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*McAdams et al. (1942)	17,4/ 733,1	24,7/ 130,8	16,4/ 109,6	15,7/ 64,9	24,7/ 95,8	20,7/ 83,9	20,7/ 83,9	24,1/ 58,7	25,1/ 153,8	21,4/ 83,8	34,1/ 48,4	23,4/ 85,3	24,4/ 394,3	24,4/ 72,3	14,7/ 63,1	19,1/ 208,5	25,8/ 271,8	23,4/ 253,7
*Davidson et al. (1943)	18,4/ 959	28,4/ 144,5	16,7/ 124,2	14,7/ 71,1	28,4/ 108,5	20,1/ 95,7	20,1/ 95,7	20,1/ 66	28,4/ 169,1	21,7/ 95,7	28,8/ 52,6	22,7/ 97,3	25,1/ 411,1	27,8/ 81,5	13,7/ 67,1	19,1/ 225,4	25,1/ 317,9	20,7/ 288
*Akers et al. (1959)	18,1/ 792	28,1/ 140,9	17,4/ 119,5	14,7/ 68,5	26,4/ 104,6	20,1/ 91,8	20,1/ 91,8	24,1/ 62,7	27,8/ 184	20,7/ 91,9	30,4/ 50,7	23,1/ 93,5	24,7/ 405,8	27,4/ 77,2	14,4/ 65,2	19,1/ 219,5	25,1/ 300,2	21,7/ 272,6
*Cicchitti et al. (1960)	18,4/ 957,5	28,1/ 143,1	16,7/ 122,7	15,1/ 70,9	28,1/ 107,1	20,4/ 94,5	20,4/ 94,5	21,1/ 65,8	28,1/ 167,7	22,1/ 94,5	29,1/ 52,3	23,1/ 96,1	24,7/ 409,7	27,8/ 80,9	13/ 67,4	18,7/ 223,9	24,7/ 315,8	20,4/ 286,1
*Owens (1961)	18,1/ 986,2	28,8/ 143	16,7/ 123,5	15,1/ 70,5	27,8/ 106,9	20,1/ 94,4	20,1/ 94,4	21,4/ 65,4	28,1/ 167,9	22,1/ 94,4	29,8/ 52	22,7/ 96	24,7/ 409,8	27,4/ 81,6	12,4/ 67	19,1/ 224,1	24,7/ 327	20,4/ 290,4
*Dukler et al. (1964)	24,4/ 486,4	27,8/ 108,7	17,7/ 81,1	13/ 62,6	27,1/ 67,9	21,4/ 64,6	21,4/ 64,6	27,4/ 54,7	29,1/ 137,8	23,1/ 62,9	30,8/ 47,9	23,1/ 63,6	26,4/ 341	33,1/ 51,2	10,4/ 65,1	26,8/ 166,7	26,4/ 182,7	30,4/ 203,3
*Beattie e Whalley (1982)	16,7/ 617,1	27,4/ 115,4	18,4/ 94,1	18,7/ 61,8	27,4/ 82,3	21,4/ 73,5	21,4/ 73,5	23,4/ 54,9	28,4/ 140,6	24,1/ 72,7	35,1/ 47	24,4/ 73,6	28,1/ 394,7	29,1/ 62,7	15,7/ 62	20,7/ 188,3	24,4/ 224,3	24,1/ 225,2
*Lin et al. (1991)	18,4/ 856,4	27,8/ 141	17,1/ 120	13,7/ 70,4	27,4/ 105,2	20,7/ 92,8	20,7/ 92,8	19,7/ 65,3	27,4/ 165,2	23,4/ 92,9	28,8/ 51,8	23,7/ 94,3	24,4/ 407,2	27,4/ 78,6	13/ 66,6	18,7/ 221,4	24,7/ 286	20,7/ 268,1
*Garcia et al. (2003)	25,1/ 448,7	28,8/ 104,9	18,4/ 76,1	12,4/ 62,2	27,1/ 64,4	21,1/ 61,6	21,1/ 61,6	27,1/ 54,3	29,1/ 133,2	23,4/ 60	29,1/ 48,5	23,4/ 60,5	26,1/ 336,1	34,4/ 49	11/ 65,4	27,4/ 161,8	27,1/ 164,5	31,1/ 192,7
*Awad e Muzychka (2008)	18,1/ 808,8	28,4/ 138,9	16,1/ 118,3	14/ 69,7	27,1/ 103,5	20,4/ 91,5	20,4/ 91,5	21,4/ 64,2	27,1/ 162,9	22,1/ 91,6	29,4/ 51,4	24,1/ 92,9	24,4/ 404,6	28,8/ 76,7	13,7/ 66,3	19,1/ 218,6	25,1/ 280,6	21,4/ 262,5
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	23,7/ 721,8	25,8/ 133,7	16,1/ 109,3	12,7/ 66,7	26,8/ 90,9	20,7/ 82,6	20,7/ 82,6	23,1/ 58,4	28,1/ 165,7	22,1/ 81,1	31,4/ 46,8	22,4/ 82,8	24,4/ 369	26,1/ 67	12,7/ 65,2	24,1/ 197,2	24,4/ 276,3	28,1/ 263,6
Lockhart e Martinelli (1949)	24,1/ 613,7	24,7/ 155,6	14/ 111	16,1/ 67,2	23,7/ 100,9	17,1/ 86,4	17,1/ 86,4	20,7/ 63,3	24,4/ 192,6	17,1/ 87,3	29,1/ 51,3	18,4/ 89,2	21,1/ 432,4	21,7/ 76,7	14,7/ 65,1	18,1/ 228,3	25,1/ 260,2	29,8/ 279,2
Chisholm (1973)	20,1/ 1337,2	27,8/ 163,8	20,1/ 133,2	19,1/ 65,8	29,4/ 113,8	23,1/ 96,3	23,1/ 96,3	28,4/ 59,9	28,8/ 195,5	26,8/ 95,9	37,8/ 45,7	29,1/ 98,9	26,1/ 440,2	29,1/ 89,6	15,7/ 62,2	19,1/ 254,6	26,4/ 400,3	22,7/ 361,3
Grönnerud (1979)	21,4/ 234,4	23,7/ 93,8	11/ 81,2	8,4/ 71,1	21,7/ 68,5	15,1/ 70,7	15,1/ 70,7	13,7/ 63,5	22,1/ 112,1	16,7/ 68,7	20,1/ 57,9	16,7/ 68,7	20,7/ 307,5	29,4/ 55,8	7/ 73,1	24,4/ 145,8	17,7/ 125	24,4/ 147,3
Friedel (1979)	7/ 1368,8	16,7/ 218,7	31,4/ 126,7	29,8/ 59,4	16,4/ 140,7	31,1/ 96,9	31,1/ 96,9	26,1/ 69,6	15,1/ 255,8	27,1/ 104,8	34,1/ 58,4	26,4/ 109,3	14,4/ 651	18,4/ 114,3	28,8/ 53,6	14/ 349	16,4/ 392,2	12/ 437,5
Friedel (1985)	7/ 1368,8	18,4/ 186,3	33,4/ 89,5	32,1/ 49,4	19,1/ 107,7	32,1/ 70,5	32,1/ 70,5	23,7/ 60,1	18,1/ 223,1	27,4/ 78,3	34,1/ 58,4	28,4/ 81,5	19,1/ 638,3	18,4/ 114,3	30,4/ 47,8	18,4/ 315,7	16,4/ 282,9	13,4/ 367
Wambsganss et al. (1992)	9,4/ 418,2	22,1/ 158,7	26,8/ 95,2	21,7/ 64,2	22,1/ 99,4	28,1/ 79,7	28,1/ 79,7	29,4/ 65,1	21,7/ 195,4	27,8/ 83,2	32,4/ 53,9	26,4/ 85	20,1/ 545,5	25,1/ 75,9	16,7/ 62,9	11/ 252,9	27,1/ 214,2	18,1/ 261,7

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.19 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -60° para $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Rbatski (2014)
Mishima et al. (1993)	18,4/ 651,1	29,8/ 137,5	26,4/ 87,7	17,4/ 60,7	30,4/ 81,7	26,4/ 69,8	26,4/ 69,8	29,4/ 57,9	29,1/ 170	28,8/ 71,1	38,5/ 45,8	31,4/ 72,5	27,1/ 485,6	38,1/ 59,7	15,4/ 60,9	20,7/ 234,8	29,1/ 227	25,1/ 267,2
Mishima e Hibiki (1996)	15,7/ 686,4	29,4/ 143,9	25,8/ 90,5	18,1/ 60,6	31,1/ 85,6	27,8/ 71,6	27,8/ 71,6	28,4/ 58,4	28,1/ 177,4	32,1/ 73,4	37,8/ 45,9	33,8/ 74,9	26,1/ 501,7	37,8/ 62,6	16,1/ 60,5	21,4/ 244,4	28,1/ 239,3	22,1/ 280,6
Lee e Lee (2001)	17,1/ 336,2	23,1/ 129,5	19,4/ 88,1	13,7/ 66,1	25,1/ 83,2	21,4/ 74,2	21,4/ 74,2	24,1/ 63,2	24,1/ 158,1	23,1/ 75	19,1/ 102,5	23,7/ 76,1	23,4/ 461,5	15,4/ 174,6	13/ 66,2	15,1/ 208,6	25,8/ 182,7	19,4/ 202,3
Yue et al. (2004)	4,7/ 1116,3	15,1/ 341,5	23,4/ 198	21,7/ 96,4	14,7/ 231,4	22,1/ 164,4	22,1/ 164,4	14/ 125,3	15,4/ 397,5	17,4/ 179,4	7/ 66,1	18,7/ 185,1	15,1/ 1025	20,4/ 56,2	23,4/ 81	13,7/ 522,9	12,4/ 502,8	9/ 588,1
English e Kandlikar (2006)	33,4/ 230,2	24,1/ 82,8	10,7/ 67,9	5,4/ 74,4	21,4/ 56,7	14,7/ 63,2	14,7/ 63,2	8/ 68,8	20,1/ 101,5	14,7/ 61,4	13,7/ 117,4	16,4/ 61,1	19,1/ 309,9	12,7/ 182,9	0,3/ 78,5	24,7/ 136,8	23,4/ 97,6	31,8/ 127,9
Ide et al. (2007)	8,4/ 1019,1	13/ 321,4	19,1/ 192,6	19,4/ 101,2	12,7/ 233,9	17,4/ 166,6	17,4/ 166,6	13/ 134,6	12,7/ 364,3	12,7/ 183	31,4/ 49,3	12/ 188	10,7/ 1145,1	37,8/ 50,2	19,4/ 86,1	13/ 536,4	9/ 459,1	12/ 530,3
Zhang et al. (2007)	24,4/ 468,8	33,8/ 108,2	19,7/ 75,8	12,7/ 62,6	30,4/ 65,3	18,1/ 63,2	18,1/ 63,2	24,7/ 57,4	33,1/ 134,7	23,7/ 62,5	27,4/ 56,9	24,1/ 63,1	30,4/ 405,6	27,1/ 73,8	11,7/ 65,5	24,7/ 187,4	31,8/ 166,5	30,8/ 200,4
Chen et al. (2007)	11,7/ 480	18,7/ 159,4	24,1/ 87,9	24,4/ 61,2	20,1/ 98,7	22,7/ 76	22,7/ 76	24,4/ 67,8	19,4/ 192,4	23,1/ 81,3	36,5/ 45,9	22,4/ 83	18,7/ 615,4	37,8/ 58,1	22,4/ 60,2	14,7/ 276,6	23,7/ 202,6	19,1/ 271,5
Zhang et al. (2010)	18,4/ 630,4	29,1/ 133,9	24,7/ 86,1	16,4/ 60,8	31,1/ 79,6	26,4/ 68,8	26,4/ 68,8	29,1/ 57,6	29,8/ 165,7	28,1/ 69,9	19,1/ 102,5	29,4/ 71,1	28,1/ 476,4	15,4/ 174,6	14/ 61,2	20,4/ 229,3	29,4/ 219,9	26,8/ 259,5

Tabela 6.20 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão</div> <div>fração de vazio</div> <div>Método de</div> <div>Previsão</div> <div>perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*Mcadams et al. (1942)	26,6/ 149,6	31,5/ 84,2	21,7/ 98,2	21,7/ 66,7	29/ 84,5	23,8/ 84,1	32,9/ 89,8	31,5/ 56,9	33,2/ 89,5	29,4/ 82	21/ 249,7	29,7/ 82,4	30,8/ 91,2	29,7/ 66,8	17,5/ 62,9	25,5/ 94,4	31,5/ 116,2	29,7 / 89,7
*Davidson et al. (1943)	26,6/ 173,5	34,6/ 94,6	23,1/ 111,2	19,6/ 74,4	34,3/ 94,6	25,5/ 94,9	36/ 101,7	27,3/ 65,1	34,3/ 101,3	31,5/ 92,8	26,2/ 135,8	31,5/ 93,3	32,9/ 103,1	36,4/ 74,8	16,1/ 69,1	28,7/ 106,3	30,8/ 134,8	32,5/ 101,2
*Akers et al. (1959)	28/ 161,4	36/ 90,3	22/ 106,6	19,6/ 72,3	33,6/ 90,9	24,5/ 91,4	36/ 97,2	28,7/ 62,3	36/ 96,7	29,7/ 89,4	38,1/ 138	30,1/ 89,7	33,2/ 98,8	35,7/ 71,4	17,5/ 67,2	29,7/ 102,1	31,1/ 126,2	30,8/ 97,6
*Cicchitti et al. (1960)	25,9/ 171,8	34,3/ 93,4	23,1/ 109,8	19,9/ 73,6	34,3/ 93,5	25,5/ 93,7	35,7/ 100,5	27,6/ 64,5	33,9/ 100,1	31,5/ 91,7	24,5/ 141,1	31,5/ 92,1	32,5/ 102	36,4/ 74	16,4/ 68,6	28/ 105	30,4/ 133,3	32,5/ 100
*Owens (1961)	25,9/ 172,9	34,6/ 93,2	22,7/ 110	19,9/ 73	34,3/ 93,2	25,5/ 93,5	35/ 100,5	28/ 63,8	33,9/ 100,1	30,8/ 91,4	38,8/ 136,8	31,5/ 91,9	32,5/ 101,9	36/ 73,9	16,4/ 68	28/ 104,9	30,1/ 133,9	32,2/ 99,8
*Dukler et al. (1964)	40,6/ 88,7	41,3/ 52,5	24,5/ 70,5	18,5/ 59,3	36,7/ 54,4	27,6/ 61,4	37,8/ 57,6	29,4/ 48,5	40,6/ 56,6	30,4/ 58,6	40,6/ 136,5	32,2/ 58,1	38,1/ 58,7	41,6/ 43,3	14,3/ 59,8	39,2/ 60	34,6/ 73,8	33,6/ 60,4
*Beattie e Whalley (1982)	21/ 135,1	32,5/ 71,8	25,5/ 83,7	24,1/ 60,7	35/ 72	30,4/ 71,7	33,6/ 76,5	35,7/ 52,3	32,5/ 76,2	33,9/ 70,1	30,1/ 116,9	35/ 70,3	30,4/ 77,4	38,5/ 57,1	21,7/ 58,8	28,3/ 80,5	29,7/ 100,8	33,2/ 76,7
*Lin et al. (1991)	27,3/ 169,1	35,7/ 93,2	23,4/ 110,5	17,1/ 74,8	34,3/ 93,6	25,2/ 94,6	35,7/ 100,7	24,5/ 65,4	35/ 100,2	30,8/ 92,5	26,9/ 130,4	31,5/ 92,9	32,9/ 102,3	37,1/ 73,9	15,7/ 69,3	27,6/ 105,4	30,8/ 132,3	31,8/ 100,9
*Garcia et al. (2003)	40,6/ 85,4	40,9/ 48,8	23,8/ 66	18,2/ 57,9	35,7/ 50,9	28,7/ 58	38,8/ 53,5	29,7/ 47,6	41,6/ 52,5	30,4/ 55,4	31,5/ 136,3	32,5/ 54,7	37,8/ 54,5	41,3/ 41	14/ 59,1	39,5/ 55,8	34,3/ 67,6	33,9/ 56,6
*Awad e Muzychka (2008)	25,9/ 165,5	33,6/ 92,3	23,1/ 108,8	18,5/ 73,9	33,6/ 92,7	24,8/ 93,3	35,7/ 99,4	26,9/ 64,3	34,3/ 99	30,8/ 91,3	29,4/ 116,9	30,8/ 91,6	31,8/ 101	35,7/ 73,1	16,8/ 68,6	28,3/ 104,2	30,4/ 129,8	31,8/ 99,6
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	36,4/ 141	38,5/ 76,2	23,4/ 96,4	17,1/ 67,7	34,6/ 77,1	25,9/ 81,7	36,4/ 83,3	28,3/ 56,1	38,5/ 82,5	28,3/ 78,7	26,2/ 136,5	30,1/ 78,9	35,7/ 84,2	37,4/ 59,9	14,7/ 64,7	36/ 86,1	31,5/ 111,3	31,1/ 84
Lockhart e Martinelli (1949)	39,2/ 139,7	40,9/ 82	15,7/ 100,8	18,2/ 69,5	33,9/ 83	21/ 86,4	33,9/ 89,4	25,9/ 60,2	37,1/ 88,6	22,7/ 84	29,7/ 120,3	23,4/ 84,2	32,5/ 91,5	35,7/ 65,4	17,1/ 65,3	33,6/ 94,6	36/ 113	27,6/ 90,4
Chisholm (1973)	24,1/ 217,8	36/ 102,3	25,9/ 119,1	26,9/ 69,4	32,9/ 100,8	32,9/ 97,8	33,9/ 110,5	37,4/ 58,2	34,3/ 110,5	35,7/ 95,6	22,7/ 149	36/ 97,1	31,5/ 111,6	32,9/ 80,7	24,1/ 63,2	28,3/ 116,1	31,8/ 155,2	32,9/ 106,4
Grönnerud (1979)	39,5/ 72,1	28,7/ 58	14/ 74,4	10,8/ 67,8	26,6/ 60,1	16,8/ 68,2	26,9/ 62,6	21/ 59,1	28,3/ 61,2	21/ 65,5	18,5/ 161,9	22/ 65	26,2/ 62,5	29,4/ 52,3	8,7/ 68,7	29/ 62,1	26,9/ 70,2	25,2/ 65,3
Friedel (1979)	6,6/ 275,7	20,6/ 130,5	27,3/ 121,6	35,7/ 65,7	19,6/ 124,8	26,9/ 104,7	22,4/ 133,5	27,6/ 69,1	20,6/ 136	22,7/ 107,7	31,8/ 99,8	22,7/ 110,2	19,2/ 138	21/ 104,9	35,7/ 57,2	17,5/ 148,9	19,2/ 178,8	18,2/ 125,7
Friedel (1985)	6,6/ 275,7	20,6/ 130,5	27,3/ 121,6	35,7/ 65,7	19,6/ 124,8	26,9/ 104,7	22,4/ 133,5	27,6/ 69,1	20,6/ 136	22,7/ 107,7	12,2/ 287,1	22,7/ 110,2	19,2/ 138	21/ 104,9	38,5/ 46,1	20,6/ 111,6	21/ 127,9	24,1/ 90,8
Wambsganss et al. (1992)	20,6/ 129,9	22/ 84,8	33,2/ 85,9	32,2/ 62,4	22,4/ 83	32,2/ 77,5	23,1/ 87,7	34,6/ 59,5	21,7/ 89	26,6/ 78,4	12,2/ 287,1	24,8/ 78,6	21,3/ 92,6	22/ 68,8	28,7/ 60,2	15,4/ 100,6	27,6/ 102,6	23,8/ 87,4

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.20 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 0^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayt e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima et al. (1993)	23,8/ 132	40,9/ 62,1	40,2/ 73,5	27,6/ 57,7	37,4/ 62,5	41,6/ 64,2	36,4/ 67,3	39,9/ 49,6	37,1/ 67,3	44,8/ 63,4	14,3/ 209,2	45,8/ 63,1	35,3/ 71,1	41,3/ 48,6	22,7/ 56,7	32,5/ 77,6	32,9/ 86,7	35/ 69,5
Mishima e Hibiki (1996)	19,2/ 141,7	40,6/ 65,8	39,9/ 76,2	27,3/ 57,9	36/ 65,9	42,3/ 66,4	36,4/ 71,1	39,9/ 50,5	39,9/ 71,3	42,7/ 65,8	23,1/ 179	43/ 65,5	34,6/ 75,2	40,2/ 51,1	24,8/ 56,5	33,6/ 82,2	32,2/ 92,6	33,2/ 72,8
Lee e Lee (2001)	18,2/ 102,9	28,3/ 69,5	27,6/ 77,8	22/ 63,7	31,1/ 69,3	32,2/ 69,8	31,1/ 73,2	33,9/ 56,4	28,7/ 73,2	33,6/ 69,1	23,1/ 186,9	35,7/ 69,1	28,7/ 76,2	32,2/ 58,3	18,2/ 63	24,1/ 81,2	26,6/ 85,6	34,3/ 74,4
Yue et al. (2004)	2,4/ 361,8	15,7/ 209	17,5/ 188,6	23,4/ 113	15,7/ 200,4	19,2/ 171,3	17,5/ 212,2	16,8/ 127,5	17,5/ 216,6	17,5/ 177,7	16,4/ 169,8	19,2/ 180,3	16,1/ 221	17,5/ 166,7	23,4/ 96,6	14/ 238,8	14,7/ 261,2	17,5/ 203,7
English e Kandlikar (2006)	50,7/ 46,8	29/ 47,5	11,2/ 62,1	8/ 68,2	26,6/ 50,2	14/ 59,9	25,2/ 50,8	12,9/ 61,4	26,2/ 49,4	16,8/ 57,4	14/ 436,1	16,8/ 56,7	24,5/ 51	23,8/ 50,4	5,2/ 71,6	28,3/ 50,6	28,7/ 49,7	21,3/ 54,4
Ide et al. (2007)	12,6/ 337,7	14,3/ 213,8	15,7/ 186,9	18,2/ 119,4	12,2/ 206,5	15/ 174,3	12,9/ 215,6	11,9/ 138,9	15/ 219,6	12,9/ 182,6	19,2/ 110,3	12,6/ 184,8	14,3/ 225,1	14,3/ 176,5	19,6/ 103,3	15/ 242,9	11,2/ 257,9	10,8/ 208,4
Zhang et al. (2007)	41,6/ 84,5	45,5/ 47,3	26,2/ 63,2	17,1/ 58,3	41,3/ 49,4	29,7/ 57	43,7/ 52,1	30,4/ 48,8	44,1/ 51,2	32,2/ 54,3	18,9/ 474,5	33,2/ 53,6	39,5/ 54,5	43,7/ 40,3	13,6/ 59,3	37,8/ 57,4	49/ 61,5	36,4/ 55,9
Chen et al. (2007)	23,4/ 132,2	22,7/ 80,2	25,5/ 78	27,6/ 59,7	23,1/ 79	26,6/ 72,4	24,1/ 82,4	29,7/ 60,9	23,1/ 83,6	22,4/ 74,3	28,7/ 142,2	21,3/ 74,3	22,7/ 88	21,7/ 66,1	29/ 57,1	20,6/ 96,9	27,6/ 94,9	21/ 83,4
Zhang et al. (2010)	26,6/ 126,4	39,5/ 59,9	39,2/ 72	26,6/ 57,6	37,1/ 60,6	39,9/ 62,9	36,7/ 65,1	38,8/ 49,1	36,7/ 65	43,4/ 62,1	18,5/ 236,1	45,8/ 61,7	35,7/ 68,8	41,3/ 47,2	21/ 56,9	31,8/ 74,9	33,9/ 83,4	35/ 67,7

Tabela 6.21 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 45^\circ$ (ξ [%]/ η [%]).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
*McAdams et al. (1942)	24,4/ 133,3	27,8/ 80,6	23,1/ 85,5	23,7/ 62,3	26,1/ 80	26,1/ 80	28,5/ 82,9	30,8/ 55,9	28,8/ 83,2	29,2/ 74,8	24,4/ 276,9	29,5/ 75,2	27,5/ 85,8	69,8/ 66,5	20/ 60,4	14,2/ 117	18,6/ 120,1	17,3/ 94,8
*Davidson et al. (1943)	21/ 158,9	31,9/ 91,2	24,4/ 98,4	22/ 68,5	30,5/ 90,4	30,5/ 90,4	31,9/ 95	29,2/ 62,8	33,2/ 95,3	29,8/ 85,1	24,7/ 141,3	30,5/ 85,8	30,5/ 97,9	26,1/ 64,1	18,6/ 65,1	16,9/ 128,2	20/ 134,9	19,7/ 105
*Akers et al. (1959)	23,4/ 143,6	33,2/ 85,8	23,1/ 92	19,7/ 67,3	31,9/ 85,4	31,9/ 85,4	31,9/ 89	28,1/ 61,1	32,5/ 89,3	29,8/ 80,7	38,6/ 144	30,5/ 81	29,5/ 92,1	32,9/ 71,7	18,6/ 64,2	17,6/ 125,3	19,7/ 129,3	19,3/ 102,8
*Cicchitti et al. (1960)	21/ 157,4	31,9/ 90	24,4/ 97,1	22,4/ 67,7	30,5/ 89,3	30,5/ 89,3	31,9/ 93,8	29,5/ 62,1	32,9/ 94,1	29,8/ 84	23,4/ 145,4	30,5/ 84,7	30,5/ 96,7	32,9/ 67,8	19,3/ 64,6	16,9/ 127	20/ 133,4	19,7/ 103,8
*Owens (1961)	22,7/ 155,3	31,9/ 89,3	22,4/ 98	21,4/ 68,3	31,2/ 88,9	31,2/ 88,9	31,2/ 93,7	27,5/ 62,8	32,9/ 93,8	28,1/ 84,6	39,3/ 143,8	28,5/ 85,2	30,5/ 96,7	33,2/ 70,8	19,6/ 64,5	18,3/ 128,4	21,4/ 135,6	21/ 105,5
*Dukler et al. (1964)	30,5/ 87,9	40/ 50,7	24,7/ 61,9	18,6/ 56,1	38/ 51,5	38/ 51,5	38/ 53,6	26,8/ 47,6	37,3/ 53,4	30,8/ 53,5	42,7/ 140,1	32,9/ 53	37,3/ 56,7	32,9/ 70,5	16,8/ 58,4	26,4/ 77,9	26,1/ 76,5	27,8/ 63,2
*Beattie e Whalley (1982)	16,3/ 123,6	31,5/ 69,2	26,8/ 74,4	24,7/ 57,7	30,2/ 69,1	30,2/ 69,1	35,3/ 71,1	31,2/ 52,3	31,9/ 71,5	28,1/ 65,1	32,5/ 122,9	32,5/ 65,2	30,2/ 73,8	43,1/ 41,1	21,1/ 57,3	15,9/ 103,2	20,7/ 103,6	22,7/ 82
*Lin et al. (1991)	22/ 148,8	32,2/ 87,3	23,4/ 94,1	19,7/ 68,4	31,2/ 86,8	31,2/ 86,8	32,2/ 90,8	24,7/ 62,7	32,5/ 91,1	29,8/ 82,1	25,4/ 134,1	30,2/ 82,6	30,5/ 93,9	32,2/ 55,5	17,2/ 65,2	18/ 126,9	20/ 132,5	20,3/ 104,4
*Garcia et al. (2003)	30,8/ 82,5	39,3/ 48	25,1/ 59	19/ 55,3	37,3/ 49,1	37,3/ 49,1	38,3/ 50,7	28,8/ 47,2	38,6/ 50,4	31,2/ 51,5	30,5/ 144,1	33,2/ 50,8	36,9/ 53,8	33,2/ 68,6	17,9/ 58	27,5/ 74,2	25,8/ 71,4	28,5/ 60
*Awad e Muzychka (2008)	20,7/ 145,7	32,2/ 86	25,8/ 92,5	18/ 68	31,2/ 85,5	31,2/ 85,5	31,9/ 89,3	25,8/ 61,9	32,9/ 89,6	31,9/ 80,8	27,5/ 122,9	31,9/ 81,2	30,5/ 92,4	43,4/ 39,4	17,2/ 64,9	16,3/ 126,1	19/ 131,1	18,6/ 103,9
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	28,1/ 125,3	34,6/ 70,3	23,7/ 81,5	19/ 62	34,6/ 70,2	34,6/ 70,2	33,2/ 74,2	29,2/ 53,6	32,9/ 74,2	30,2/ 68,9	25,4/ 144,3	31,2/ 69	33,2/ 77	33,2/ 67,7	15,4/ 61,2	22,4/ 104	23,1/ 109,5	25,4/ 85
Lockhart e Martinelli (1949)	32,5/ 131,9	36,6/ 78,6	18,3/ 87,3	18/ 65	33,6/ 78,1	33,6/ 78,1	33,9/ 82,4	22/ 59,6	33,9/ 82,8	25,4/ 76,5	27,5/ 125,7	24,4/ 76,7	32,2/ 87	35,3/ 55,3	17,5/ 62,5	20,3/ 114,8	25,4/ 116,2	21,4/ 93
Chisholm (1973)	22/ 189,8	29,8/ 97,8	26,8/ 103,9	26,1/ 63,6	30,5/ 95,1	30,5/ 95,1	30,8/ 101,8	35,3/ 56,5	29,8/ 103	31,5/ 86,8	22/ 155,9	32,9/ 88,3	28,5/ 105,3	33,9/ 62,3	26,3/ 58,5	16,6/ 140,2	23,1/ 151,6	23,7/ 109,7
Grønnerud (1979)	33,2/ 67	26,4/ 55,7	15,9/ 67,2	12,9/ 65,8	25,8/ 57,3	25,8/ 57,3	25,8/ 58,5	21,4/ 58,4	26,1/ 57,6	22/ 61,1	18,3/ 167,2	22,4/ 60,5	26,1/ 60,2	34,6/ 75,4	9,8/ 68	24,4/ 72,6	21,7/ 71,4	21,4/ 65
Friedel (1979)	10,8/ 244,7	15,3/ 129,8	27,8/ 112,2	34,2/ 63,2	18,3/ 122,3	18,3/ 122,3	15,9/ 130,3	30,5/ 69,2	15,3/ 134,1	25,1/ 102,8	27,8/ 105,1	24,1/ 105,4	14,9/ 137,9	29,5/ 50,4	34,4/ 54,5	15,9/ 185,5	20,3/ 183,4	20/ 137
Friedel (1985)	10,8/ 244,7	15,3/ 132,8	27,8/ 121,	34,2/ 61,2	18,3/ 108,4	18,3/ 105,3	15,9/ 100,3	30,5/ 52,5	15,3/ 104,2	25,1/ 142,8	13,2/ 151,5	24,1/ 105,4	14,9/ 107,5	22,7/ 92,3	34,4/ 45,7	14,7/ 147,7	22/ 136,5	22,7/ 104,4
Wambsganss et al. (1992)	20,3/ 118,8	21,7/ 80,8	29,5/ 75,6	31,5/ 60	20,3/ 78,9	20,3/ 78,9	21,4/ 81,6	29,8/ 61,2	22,7/ 83,1	24,7/ 73,6	13,2/ 291,7	24,1/ 73,7	19,7/ 88,7	22,7/ 102,1	27,4/ 59,2	12,2/ 120,3	21/ 106,3	15,3/ 92,8

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.21 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 45^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div> Método de previsão fração de vazio </div> <div> Método de Previsão perda de pressão </div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesenayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribatski (2014)
Mishima et al. (1993)	20,7/ 113,8	39,7/ 60	35,6/ 63,6	26,1/ 54,9	39,7/ 59,1	39,7/ 59,1	38,3/ 62,9	32,5/ 50,6	38,3/ 63,9	37,6/ 58,3	13,9/ 211,9	38,6/ 57,9	35,9/ 69,3	20,7/ 66,1	24,6/ 55,3	23,7/ 97,5	31,2/ 88,4	25,4/ 73,5
Mishima e Hibiki (1996)	18/ 121,9	38,6/ 63,6	35,6/ 65,8	27,1/ 54,8	38,6/ 62	38,6/ 62	37,3/ 66,3	32,9/ 51,5	37,6/ 67,5	35,6/ 60,3	24,1/ 182,7	38/ 60	35,9/ 73	43,4/ 45,9	26/ 55,1	23,1/ 102,6	29,2/ 94	26,1/ 76,8
Lee e Lee (2001)	18,6/ 92,8	28,1/ 67,3	28,5/ 69,6	25,4/ 61,7	27,5/ 66,7	27,5/ 66,7	26,8/ 69,2	31,5/ 57,7	27,5/ 69,6	30,8/ 65,5	22,7/ 190,4	30,5/ 65,5	25,1/ 74,3	43,4/ 48	19,3/ 62,2	15,3/ 96,7	18,3/ 87,8	21/ 77,4
Yue et al. (2004)	6,1/ 317	12,5/ 194,3	20/ 161,9	21/ 103,3	15,3/ 184,5	15,3/ 184,5	13,9/ 193,6	20,3/ 120,9	12,9/ 198,9	20,7/ 159,1	14,6/ 173,5	20/ 161,7	13,6/ 206,3	28,8/ 57,2	19,6/ 90,8	17,3/ 265,5	19,7/ 253,6	22,7/ 202,8
English e Kandlikar (2006)	41,4/ 45,3	28,8/ 48,3	13,6/ 59,6	8,1/ 68,5	26,1/ 50,5	26,1/ 50,5	24,4/ 50,7	12,2/ 62,8	25,8/ 49,7	18/ 56,6	13,6/ 430	18,6/ 56	24,7/ 52,8	18/ 153,9	4,9/ 72,1	26,4/ 58,1	26,8/ 50,9	19,7/ 54,8
Ide et al. (2007)	11,5/ 311,9	14,2/ 202	16,3/ 167,2	17,6/ 112,5	16,3/ 193,1	16,3/ 193,1	14,9/ 200,3	13,6/ 134,4	15,3/ 205,7	16,3/ 168,3	19/ 113,7	16,6/ 170,4	15,3/ 214,3	24,4/ 51,2	16,8/ 100,7	18,3/ 267,5	18,6/ 251,6	17,6/ 208,3
Zhang et al. (2007)	34,2/ 74,1	42/ 46,8	30,8/ 55,9	18,6/ 56,7	40,7/ 48,1	40,7/ 48,1	39/ 49,5	27,8/ 50,3	41/ 49,5	30,2/ 51,3	18,6/ 469,4	32,2/ 50,5	38,3/ 54,4	16,9/ 165,9	16,1/ 58,6	27,8/ 74,1	34,6/ 63,8	27,5/ 59,1
Chen et al. (2007)	23,1/ 120,7	24,7/ 77,4	25,8/ 69,9	27,5/ 58,4	23,1/ 75,6	23,1/ 75,6	25,8/ 78	26,1/ 62,6	24,7/ 79,8	20,7/ 70,7	26,1/ 146	21,4/ 70,6	24,1/ 86,4	41/ 39,9	27/ 56,9	16,9/ 115,7	27,5/ 97,1	17,6/ 87,6
Zhang et al. (2010)	22,7/ 109	40,3/ 58	36,3/ 62,3	26,1/ 54,9	40/ 57,4	40/ 57,4	38,3/ 60,9	32,9/ 50,2	39/ 61,8	38,3/ 57,2	18/ 236,1	39,3/ 56,7	35,6/ 67,2	23,4/ 63,6	23,2/ 55,6	23,1/ 94,5	31,2/ 85,2	25,4/ 71,7

Tabela 6.22 Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Rbatski (2014)
*Mcadams et al. (1942)	27,7/ 131,2	25,6/ 84,5	20/ 92	22,1/ 64,8	24,6/ 84	23,2/ 80,4	27,7/ 87,4	31,6/ 56,4	27,4/ 87,5	26/ 79,1	21,8/ 299,3	26,7/ 79,6	26/ 87,8	45,3/ 78,3	19,3/ 61,6	23,5/ 90,8	28,8/ 110	26,7/ 86,7
*Davidson et al. (1943)	23,2/ 149,1	33/ 91	22,1/ 101	20,4/ 70,1	31,2/ 90,5	25,6/ 87,8	32,3/ 95,2	28,1/ 62,3	32,3/ 95,2	29,1/ 86,4	42,1/ 62,7	29,8/ 86,9	31,6/ 95,6	9,8/ 104,3	17,2/ 65,8	28,4/ 98,5	28,1/ 123,5	31,9/ 94,5
*Akers et al. (1959)	26,7/ 140,9	31,9/ 90	20,7/ 99,1	19,6/ 70,3	29,5/ 89,8	24,6/ 87	30,9/ 93,8	27,7/ 62	31,6/ 93,8	27,7/ 85,8	60,4/ 61,8	28,4/ 86,1	30,2/ 94,4	14/ 112,4	17,5/ 65,8	28,1/ 97,4	29,5/ 118,2	28,1/ 93,8
*Cicchitti et al. (1960)	23,2/ 147,3	33/ 89,7	22,1/ 99,4	20,4/ 69,2	31,2/ 89,2	25,6/ 86,5	32,3/ 93,8	28,1/ 61,6	32,3/ 93,8	29,1/ 85,1	37,9/ 66,1	29,8/ 85,6	31,6/ 94,2	15,1/ 113,2	17,2/ 65,1	28,4/ 97,1	28,1/ 121,7	31,9/ 93,1
*Owens (1961)	22,5/ 151,1	32,6/ 91,9	21,8/ 102,1	20,4/ 70,3	31,2/ 91,2	26/ 88,6	32,3/ 96,2	28,8/ 62,4	32,3/ 96,2	29,1/ 87,1	61,1/ 61,7	30,2/ 87,7	31,2/ 96,6	14/ 110	17,9/ 65,9	28,1/ 99,5	27,7/ 125,1	30,9/ 95,3
*Dukler et al. (1964)	30,9/ 81,1	38,6/ 53,4	23,5/ 66,2	17,5/ 58,3	36,5/ 54,5	27,7/ 59	38,6/ 56,4	27,4/ 48,7	41,4/ 55,7	30,5/ 56,7	61,4/ 61	30,5/ 56,1	37,9/ 56,4	13,3/ 113,4	14/ 9,4	38,9/ 57,2	31,9/ 70,3	34/ 58,3
*Beattie e Whalley (1982)	14,7/ 118,2	29,1/ 72,7	24,9/ 78,9	24,2/ 59,6	29,8/ 72,1	31,2/ 69	29,5/ 75	34,4/ 51,9	29,5/ 75,1	33/ 68	38,2/ 61,3	31,9/ 68,2	28,4/ 75,4	20,4/ 69,3	20,4/ 58	24,9/ 78	26,3/ 96,2	30,9/ 74,6
*Lin et al. (1991)	23,5/ 144,7	35,1/ 90,1	22,1/ 100,8	16,5/ 72	32,3/ 89,9	25,6/ 88,3	34/ 94,5	24,2/ 64,1	34/ 94,4	29,8/ 86,8	39,6/ 57,7	31,2/ 87,2	32,6/ 95,1	19,6/ 87,3	14,4/ 67,3	28,8/ 98	29,5/ 120,8	32,6/ 94,6
*Garcia et al. (2003)	30,9/ 75,1	38,2/ 50,3	23,5/ 62,7	17,2/ 57,3	36,8/ 51,5	27,4/ 56,4	38,6/ 52,9	29,1/ 48	41,1/ 52,2	30,9/ 54,1	47/ 62,4	31,2/ 53,5	38,2/ 52,9	16,1/ 114,2	15,8/ 58,9	41,1/ 53,7	31,6/ 65,4	33/ 55,2
*Awad e Muzychka (2008)	24,6/ 142,1	33/ 90,2	21,4/ 100,5	18,2/ 71,6	30,9/ 90,1	24,6/ 88,2	32,3/ 94,5	25,3/ 63,5	33/ 94,4	27,7/ 86,8	36,1/ 62,5	28,8/ 87,2	30,2/ 95,1	21,1/ 65,1	15,4/ 66,9	28,4/ 98	28,8/ 119,5	29,5/ 94,6
Müller-Steinhagen e Heck (1986)	28,8/ 120,7	32,3/ 75	21,4/ 88,2	17,5/ 65,5	30,2/ 75,3	26/ 76,6	33/ 79,3	26,7/ 55,4	33,3/ 78,9	29,1/ 74,3	41,4/ 63,1	29,5/ 74,5	32,3/ 79,2	16,5/ 113,9	15,1/ 63,1	32,6/ 80,7	28,1/ 102,5	30,2/ 79,5
Lockhart e Martinelli (1949)	37,2/ 120,3	34,7/ 79,8	16,5/ 93,5	16,8/ 67,2	32,3/ 80,4	20/ 81,9	31,6/ 84,7	24,9/ 59,2	33,7/ 84	23,5/ 80,2	44,9/ 58,3	24,6/ 80,4	32,6/ 85,7	15,1/ 97,8	16,8/ 63,7	33,7/ 87,8	32,3/ 105,1	27/ 85,7
Chisholm (1973)	23,9/ 179,8	28,8/ 101	24,9/ 109,5	24,9/ 66,6	28,8/ 98,9	30,5/ 92,1	29,5/ 105,5	38,2/ 57	28,4/ 106	32,6/ 90,7	34,7/ 76,9	33,3/ 92,3	27,7/ 105,8	13,3/ 103,9	25,3/ 61,1	25,3/ 109,9	25,6/ 143,9	29,8/ 101,3
Grønnerud (1979)	34,7/ 65,2	27,7/ 57,3	14/ 70,7	11,9/ 67,1	25,3/ 59	16,5/ 65,8	27/ 60,8	17,5/ 59,2	28,1/ 59,7	19,6/ 63,5	29,8/ 84,4	20/ 63	27,4/ 60,5	21,8/ 122,9	8,8/ 68,4	29,5/ 59,2	25,3/ 66,6	25,3/ 63,1
Friedel (1979)	13,7/ 223,5	17,2/ 128,3	28,1/ 115,1	35,8/ 63,7	16,8/ 122,8	28,1/ 100,5	16,8/ 129,2	29,1/ 67,2	17,5/ 131,8	22,8/ 103,8	28,8/ 63,7	21,8/ 106,3	16,5/ 132,3	15,8/ 73,2	34,7/ 55,4	14/ 141,9	14,7/ 169,8	17,5/ 121,7
Friedel (1985)	13,7/ 163,5	17,2/ 105,1	28,1/ 185,1	35,8/ 60,2	16,8/ 92,1	28,1/ 90,3	16,8/ 109,1	29,1/ 50,2	17,5/ 104,8	22,8/ 93,2	23,2/ 109,8	21,8/ 96,7	16,5/ 172,3	29,1/ 123	37,9/ 45	17,5/ 105,6	15,8/ 122,1	20,7/ 87,8
Wambsganss et al. (1992)	21,1/ 112,4	21,4/ 80,3	29,5/ 80	31,2/ 60,6	23,9/ 78,9	28,8/ 73,2	21,4/ 81,9	37,5/ 57,7	21,8/ 82,8	27/ 74,1	23,2/ 149,9	26,7/ 74,2	19,3/ 85,5	29,1/ 123	28,4/ 59,5	16,1/ 91,5	28,8/ 94,2	22,5/ 82,3

* Este método corresponde ao modelo homogêneo com viscosidade bifásica correlacionada segundo o autor respectivo.

Tabela 6.22 (Continuação) Parâmetros estatísticos resultantes da comparação entre métodos de previsão da literatura e resultados experimentais para canal inclinado segundo ângulo de -30° para $\theta = 60^\circ$ ($\xi[\%]/\eta[\%]$).

<div>Método de previsão fração de vazio</div> <div>Método de Previsão perda de pressão</div>	Homogêneo	Bankoff (1960)	Thom (1964)	Turner e Wallis (1965)	Zuber e Findlay (1965)	Barcozy (1966)	Smith (1969)	Pernoli et al. (1971)	Chisholm (1973)	Lockhart e Martinelli (1949)	Ishii (1977)	Spedding e Chen (1984)	Chen (1986)	Usui e Sato (1989)	Zhao et al. (2000)	Woldesemayat e Ghajar (2007)	Xiong e Chung (2007)	Kanizawa e Ribarski (2014)
Mishima et al. (1993)	22,1/ 100,6	37,5/ 60,3	37,2/ 68	27/ 56,7	37,5/ 60,3	39,3/ 60,5	37,5/ 63,6	36,8/ 48,3	36,5/ 63,8	40,4/ 60	18,6/ 103,6	41,4/ 59,6	35,1/ 66,4	8,8/ 95,3	22,5/ 56,2	31,6/ 71	34,4/ 79,8	36,5/ 65,6
Mishima e Hibiki (1996)	20/ 108	37,2/ 63,9	37,9/ 70,3	27,4/ 56,6	36,8/ 63,4	40/ 62,4	36,5/ 67	37,5/ 48,9	36,5/ 67,4	40,7/ 62,1	36,1/ 84,6	41,4/ 61,8	33,3/ 69,9	23,2/ 74,9	25,3/ 55,9	30,2/ 75,1	31,9/ 85	35,4/ 68,5
Lee e Lee (2001)	17,9/ 90,5	28,1/ 66,8	27,4/ 72,9	23,5/ 62,7	30,2/ 66,6	31,6/ 66,3	32,3/ 69	35,1/ 55,4	29,8/ 69,2	31,6/ 65,5	34/ 88,5	33/ 65,3	29,5/ 71,3	24,9/ 77,7	16,5/ 62,7	23,9/ 75	27,4/ 79,2	34/ 70
Yue et al. (2004)	7,4/ 296,1	15,4/ 191,5	20/ 168,6	24,2/ 103,9	15,1/ 184,8	18,6/ 154,9	15,1/ 192,6	20/ 117,1	16,1/ 196,2	18,6/ 161,5	20,7/ 89,7	18,9/ 163,9	14,4/ 199	10,9/ 84,4	23,2/ 89,5	14/ 213,6	12,6/ 235	15,1/ 186,3
English e Kandlikar (2006)	46,7/ 38,6	25,3/ 49,2	12,6/ 61,4	6/ 69,3	22,1/ 51,4	12,3/ 60,2	23,2/ 51,7	10,5/ 63,3	23,9/ 50,5	14,7/ 57,9	22,8/ 201	15,4/ 57,2	23,2/ 51,4	23,9/ 178,6	4,2/ 72,7	26,3/ 50,1	29,8/ 49,3	21,8/ 54,6
Ide et al. (2007)	11,2/ 294,6	12,6/ 199,4	19,3/ 171,7	18,9/ 112,1	13,3/ 192,8	18,2/ 160,7	13/ 198,9	14/ 129	13/ 202,7	15,1/ 168,3	12,3/ 74	15,4/ 170,5	12,6/ 206,3	15,8/ 61	18,9/ 97,7	12,3/ 221,6	11,2/ 236,9	13,7/ 193,4
Zhang et al. (2007)	36,5/ 64,5	44,2/ 47,1	27/ 60	14,4/ 58,2	41,8/ 48,6	29,1/ 55,2	42,5/ 50	29,8/ 49,3	44,2/ 49,4	31,6/ 52,8	30,9/ 187,4	32,6/ 51,9	41,1/ 51,8	19,6/ 166,7	14/ 59,5	41,8/ 53,9	44,9/ 57,2	34,4/ 53,4
Chen et al. (2007)	23,2/ 106,8	22,1/ 75,5	25,3/ 72,5	30,2/ 57,6	22,8/ 74,5	21,4/ 68,1	23,2/ 76,8	29,5/ 58,1	22,1/ 77,7	20,4/ 69,8	37,9/ 70,9	22,5/ 69,8	20,7/ 80,9	17,2/ 63	30,5/ 55,7	18,9/ 87,6	28,8/ 87,1	21,1/ 78,1
Zhang et al. (2010)	22,8/ 96,3	37,2/ 58,4	35,4/ 66,7	27/ 56,7	37,9/ 58,6	38,9/ 59,5	37,9/ 61,7	36,5/ 48	37,9/ 61,8	40,7/ 58,8	27,4/ 100	42,1/ 58,3	35,4/ 64,4	14,4/ 78	20,4/ 56,5	30,5/ 68,7	36,1/ 76,7	37,5/ 63,9

A Fig. 6.59 ilustra uma comparação entre métodos de previsão de perda de pressão por atrito da literatura e o gradiente de pressão por atrito para canal descendente. A parcela gravitacional de perda de pressão obteve-se a partir da avaliação da fração de vazio com base no método de Turner e Wallis (1965), que foi desenvolvido para escoamento ascendente.

Figura 6.59 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal horizontal para $\theta = -90^\circ$ para $j_L = 0,3051$ m/s. Fração de vazio estimada segundo Turner e Wallis (1965).

Observa-se que, segundo este método de previsão de fração de vazio superficial, o gradiente de pressão por atrito diminui com acréscimos de j_G .

A Fig. 6.60 ilustra comparação entre métodos de previsão de perda de pressão por atrito da literatura e gradiente de pressão por atrito experimental em canal descendente obtido a partir da avaliação da parcela gravitacional de perda de pressão com base no método de Usui e Sato (1989) para a estimativa da fração de vazio superficial. Vale ressaltar que o método de previsão da fração de vazio superficial proposto por Usui e Sato (1989) é desenvolvido para escoamento descendente.

Figura 6.60 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal horizontal para $\theta = -90^\circ$ para $j_L = 0,3051$ m/s. Fração de vazio estimada segundo Usui e Sato (1989).

Neste caso, observa-se que o gradiente de pressão por atrito aumenta conforme aumenta o valor de j_G . A Fig. 6.61 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais obtidos para o canal inclinado segundo um ângulo de -60° e os gradiente de pressão previstos segundo o método de Mishima et al. (1993), estimando a fração de vazio superficial segundo o método de Usui e Sato (1989).

Figura 6.61 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado -60° . Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Usui e Sato (1989).

Observa-se que os gradientes de pressão por atrito experimentais obtidos a partir da avaliação da parcela gravitacional de perda de pressão com base no método Usui e Sato (1989) para previsão de fração de vazio superficial apresentaram valores inferiores a 4 kPa/m.

A Fig. 6.62 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais obtidos em canal inclinado -30° , com o gradiente de pressão por atrito estimado a partir da avaliação da parcela gravitacional de perda de pressão com base no método proposto por Usui e Sato (1989), e o gradiente de pressão previsto segundo o método de Zhang et al. (2007).

Figura 6.62 Comparação entre resultados experimentais e previstos para canal inclinado -30° . Fração de vazio superficial estimada segundo o método de Usui e Sato (1989).

Nesta figura, também são observados gradientes de pressão inferiores a 4 kPa/m.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

7.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No presente estudo ensaios foram desenvolvidos para escoamento água/ ar em um canal retangular com dimensões características da transição entre macro- e micro-escala. Padrões de escoamento foram classificados segundo visualizações com câmera de alta velocidade e a técnica de agrupamento de dados *k-means*. Perda de pressão foi avaliada para condições experimentais de G variando entre 90 kg/m²s e 770 kg/m²s, e com inclinações do canal compreendendo ângulos de -90° a 90°, em relação ao plano horizontal. Adicionalmente, o canal foi rotacionado com respeito ao seu eixo longitudinal segundo ângulos de 45° e 60° e o padrão de escoamento e perda de pressão avaliados para tais condições.

A partir dos dados obtidos, mapas de escoamento foram apresentados para escoamentos segundo ângulos de inclinação entre -90° e 90°. Estes mapas foram contrastados com métodos de previsão da literatura.

Estimativas de fração de vazio superficial e volumétrica foram obtidas para escoamentos segundo bolhas a partir do processamento de imagens. Também, com base na medição da velocidade média da bolha através da técnica de correlação cruzada baseada na atenuação de um feixe de laser pelo escoamento estimou-se a fração de vazio superficial para escoamento intermitente compreendendo velocidades superficiais gasosas entre 0,5 e 2 m/s.

Resultados de perda de pressão por atrito em escoamentos horizontais foram apresentados e comparados com métodos de previsão da literatura. Analisou-se o efeito da inclinação do escoamento na perda de pressão, e a partir destes valores a perda de pressão por

atrito foi estimada, com base em 25 métodos de previsão de fração de vazio da literatura utilizados para a previsão da parcela da perda de pressão devido a efeitos gravitacionais.

7.2. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados levantados e do estudo da literatura as seguintes conclusões são extraídas do presente estudo:

Padrões de escoamento:

- A inclinação do canal tem efeito significativo no padrão de escoamento. De forma análoga, observou-se que a rotação do canal θ modifica as características do escoamento e condições de transição entre padrões.
- Verificou-se que os seguintes métodos capturam satisfatoriamente as transições, para escoamento vertical: Taitel et al. (1980), e o mapa proposto por Hibiki e Mishima (2001), Mishima et al. (1993); para horizontal: Taitel e Dukler (1976) e Felcar et al. (2007). O método de Barnea et al. (1982) não captura adequadamente a tendência da transição intermitente-anular para escoamentos descendentes.
- Para escoamentos ascendentes, as transições propostas por Mishima et al. (1993) são próximas as obtidas através do método k-means. O método de previsão desenvolvido por Taitel et al. (1980) também proporciona resultados satisfatórios em escoamento vertical ascendente.
- Para escoamento horizontal, o método de Taitel e Dukler (1976) proporciona resultados satisfatórios para transições.
- Em relação a canais rotacionados ângulos θ iguais a 45° e 60°, observaram-se efeitos significativos de estratificação. Este comportamento não foi avaliado para θ igual a 0°.

Fração de Vazio:

- A inclinação do canal e a rotação do canal θ tem um efeito significativo na fração de vazio para j_G reduzidos inferiores a 0,2 m/s.
- Para escoamento em bolhas, os métodos de previsão que proporcionam as melhores estimativas de fração de vazio foram Turner e Wallis (1965) e Thom (1964).
- Em escoamentos intermitentes com j_G entre 0,5 e 2 m/s, o efeito da rotação da seção de testes na velocidade das bolhas alongadas é reduzido.

- Escoamentos intermitentes para j_G entre 0,5 e 2 m/s não apresentaram alterações significativas na velocidade das bolhas alongadas com a inclinação do canal segundo ângulos horizontais e $\phi > 0$. Observou-se, em escoamento descendentes e canais inclinados, que a velocidade da bolha é inferior em relação as velocidades observadas em canais horizontais e escoamentos ascendentes.

Perda de Pressão:

- A inclinação do canal e a rotação do canal segundo ângulos θ têm influência significativa na perda de pressão para velocidades mássicas reduzidas, inferiores a 360 kg/m²s. Diferenças na perda de pressão foram observadas entre canais com $\theta = 0^\circ$ e canais com θ igual a 45° e 60°. Tais diferenças são intensificadas na região previa à correspondente a valores de j_G de transição (entre padrão bolhas e intermitente).
- A perda de pressão em escoamentos inclinados é superior à perda de pressão em escoamentos horizontais, com desvios superiores ocorrendo para escoamento anular.
- A perda de pressão por atrito em escoamentos horizontais é superior à perda de pressão em escoamentos descendentes, com diferenças superiores ocorrendo para o padrão anular.
- Os métodos de previsão de Zhang et al. (2010) e Mishima e Hibiki (1996) proporcionaram as melhores previsões dos resultados experimentais. Para valores de j_G superiores a 4 m/s, estes métodos proporcionam estimativas significativamente superiores das observadas experimentalmente.

7.3. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este item apresenta recomendações e observações para trabalhos futuros com base na análise da literatura, resultados experimentais obtidos neste estudo e limitações constatadas durante os ensaios:

- Desenvolvimento de uma seção de teste que possibilite a visualização lateral do escoamento;
- Avaliçãodo o efeito da inclinação no escoamento bifásico em canais retangulares com razões de aspecto distintas a deste estudo, e dispositivos com multicanais;

- Desenvolvimento de ensaios para canais com diâmetros hidráulicos inferiores em condição de micro-escala e comparação com os resultados obtidos no presente estudo;
- Estudo da influência das características da parede no escoamento, comparando resultados desenvolvidos em seções de teste que apresentem distintas rugosidades e molhabilidade;
- Levantamento do perfil de velocidades no filme líquido para os padrões segundo bolhas alongadas e anular, de forma que tais resultados possam ser incorporados a modelos de perda de pressão.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- Abernathy, R.; Thompson, J. (1973). **Handbook, Uncertainty in Gas Turbine Measurements**National Technical Information Service.
- Akagawa, K. et al. (1971). Studies on the Fluctuation of pressure Drop in Two-Phase Slug Flow : 1 st Report, Experimental Study. **Bulletin of JSME**, v.14, n.71, p.447-454.
- Akers, W.W.; Deans, H.A.; Crosser, O.K. (1959). Condensation heat transfer within horizontal tubes. **Chem. Eng. Prog. Symp.**, v.55, p.171–176.
- Ali, M.I.; Kawaji, M. (1991). The effect of flow channel orientation on two-phase flow in a narrow passage between flat plates. In: Proceedings of the 1991 ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, 1991, ASME, New York, NY. p.183-190
- Ali, M.I.; Sadatomi, M.; Kawaji, M. (1993). Adiabatic two-phase flow in narrow channels between two flat plates. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.71, n.5, p.657-666.
- Álvarez, R.P. et al. (2013). DESIGN AND ANALYSIS OF A DYNAMIC STRUCTURE FOR THE STUDY OF MULTIPHASE FLOW INDUCED VIBRATION.
- Armand, A.A. (1946). **The resistance during the movement of the two-phase system in horizontal pipes**. Izv. Vses. Teplotekh. Inst. 1.
- Awad, M.M. (2012). **Two-Phase Flow**.
- Awad, M.M.; Muzychka, Y.S. (2008). Effective property models for homogeneous two-phase flows. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.33, n.1, p.106-113.
- Azzi, A.; Friedel, L. (2005). Two-phase upward flow 90° bend pressure loss model. **Forschung im Ingenieurwesen**, v.69, n.2, p.120-130.
- Bankoff, S.G. (1960). A VARIABLE DENSITY SINGLE-FLUID MODEL FOR TWO-PHASE FLOW WITH PARTICULAR REFERENCE TO STEAM-WATER FLOW. **Journal Name: Journal of Heat Transfer (U.S.); Journal Volume: Vol: 82; Other Information: Orig. Receipt Date: 31-DEC-61**, p. Medium: X; Size: Pages: 265-72.
- Barcozy, C.J. (1966). A systematic correlation for two phase pressure drop. **Chem. Eng. Prog. Symp.**, v.62, n.44, p.232–249.
- Barnea, D.; Luninski, Y.; Taitel, Y. (1983). Flow pattern in horizontal and vertical two phase flow in small diameter pipes. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.61, n.5, p.617-620.
- Barnea, D.; Shoham, O.; Taitel, Y. (1980). Flow pattern characterization in two phase flow by electrical conductance probe. **International Journal of Multiphase Flow**, v.6, n.5, p.387-397.
- Barnea, D (1982). Flow pattern transition for vertical downward two phase flow. **Chemical Engineering Science**, v.37, n.5, p.741-744.
- Beattie, D.; Whalley, P. (1982). A simple two-phase frictional pressure drop calculation method. **International Journal of Multiphase Flow**, v.8, n.1, p.83-87.
- Beggs, H.D. (1972). **An Experimental study of two-phase flow in inclined pipes**. University of Tulsa.
- Bhusan, S. et al. (2009). Rise of Taylor bubbles through narrow rectangular channels. **Chemical Engineering Journal**, v.155, n.1–2, p.326-332.
- Butterworth, D. (1975). A comparison of some void-fraction relationships for co-current gas-liquid flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v.1, n.6, p.845-850.
- Cai, J.; Chen, T.; Ye, Q. (1997). Void fraction in bubbly and slug flow in downward air-oil two phase flow in vertical tubes. In: international symposium on multiphase flow, Beijing, 1997,

- Celata, G. (2008). Single-and two-phase flow heat transfer in micropipes. In: Fifth European Thermal-Sciences Conference, Eindhoven, The Netherlands, 2008,
- Çengel, Y.A.; Cimbala, J.M. (2008). **Mecânica dos Fluidos**.
- Chattopadhyay (2006). **Flowmeters & Flow Measurement**. Asian Books Private Limited.
- Chen, I.Y. et al. (2007). Two-phase frictional pressure drop in small rectangular channels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.32, n.1, p.60-66.
- Chen, I.Y. (2009). Two-phase flow pattern and frictional performance across small rectangular channels. **Applied Thermal Engineering**, v.29, n.7, p.1309-1318.
- Chen, J.J.J. (1986). A further examination of void fraction in annular two-phase flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.29, n.11, p.1760-1763.
- Chen, W.L.; Twu, M.C.; Pan, C. (2002). Gas-liquid two-phase flow in micro-channels. **International Journal of Multiphase Flow**, v.28, n.7, p.1235-1247.
- Cheng, L.; Ribatski, G.; Thome, J. (2008). Two-phase flow patterns and flow-pattern maps: fundamentals and applications. **Applied Mechanics Reviews**, v.61, n.5, p.050802.
- Chisholm, D. (1967). **A Theoretical Basis for the Lockhart-Martinelli Correlation for Two-phase Flow**. National Engineering Laboratory.
- Chisholm, D. (1973). Pressure gradients due to friction during the flow of evaporating two-phase mixtures in smooth tubes and channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.16, n.2, p.347-358.
- Choi, C.; Kim, M. (2011). Flow pattern based correlations of two-phase pressure drop in rectangular microchannels. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.32, n.6, p.1199-1207.
- Choi, C.; Yu, D.I.; Kim, M. (2011a). Surface wettability effect on flow pattern and pressure drop in adiabatic two-phase flows in rectangular microchannels with T-junction mixer. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.35, n.6, p.1086-1096.
- Choi, C.W.; Yu, D.I.; Kim, M.H. (2011b). Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios: Part I – Flow pattern, pressure drop and void fraction. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.54, n.1–3, p.616-624.
- Cicchitti, A. et al. (1960). **TWO-PHASE COOLING EXPERIMENTS: PRESSURE DROP, HEAT TRANSFER AND BURNOUT MEASUREMENTS** Other Information: Orig. Receipt Date: 31-DEC-60 CISE-71 Country unknown/Code not available Tue Feb 05 16:21:18 EST 2008 DTIE; NSA-14-010571 English.
- Cioncolini, A.; Thome, J.R.; Lombardi, C. (2009). Unified macro-to-microscale method to predict two-phase frictional pressure drops of annular flows. **International Journal of Multiphase Flow**, v.35, n.12, p.1138-1148.
- Coleman, J.W.; Garimella, S. (1999). Characterization of two-phase flow patterns in small diameter round and rectangular tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.42, n.15, p.2869-2881.
- Coleman, J.W. (2003). Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a. **International Journal of Refrigeration**, v.26, n.1, p.117-128.
- Collier, J.G.; Thome, J.R. (1994). **Convective Boiling and Condensation**.
- Corradini, M.L. (1997). Fundamentals of multiphase flow. Available on: <http://engr.wisc.edu/teaching/mpfBook/node26.html>.
- Crawford, T.J.; Weinberger, C.B.; Weisman, J. (1985). Two-phase flow patterns and void fractions in downward flow Part I: Steady-state flow patterns. **International Journal of Multiphase Flow**, v.11, n.6, p.761-782.
- Davidson, W.F. et al. (1943). Studies of heat transmission through boiler tubing at pressures from 500 to 3300 pounds. **Trans. ASME** v.65, p.553-59 1.
- Delmée, G.J. (2003). **Manual de Medição de Vazão**. Edgard Blucher.
- Dukler, A.E.; Wicks, M.; Cleveland, R.G. (1964). Pressure drop and hold-up in two -phase flow Part A - A comparison of existing correlations' and 'Part B - An approach through similarity analysis'. **AIChE Journal**, v.10, p.38-51.

- Elazhary, A.M. (2012). **Two-phase flow in a mini-size impacting tee junction with a rectangular cross-section**. - University of Manitoba, 2012.
- English, N.J.; Kandlikar, S.G. (2006). An experimental investigation into the effect of surfactants on air-water two-phase flow in minichannels. **Heat Transfer Engineering**, v.27, n.4, p.99-109.
- Felcar, H.; Ribatski, G. (2008). Avaliação de métodos preditivos para perda de carga durante o escoamento bifásico ea ebulição convectiva em micro-canais. In: Proceedings of the First Brazilian Meeting on Boiling, Condensation and Multiphase Flow, 2008,
- França, F.; Lahey Jr, R.T. (1992). The use of drift-flux techniques for the analysis of horizontal two-phase flows. **International Journal of Multiphase Flow**, v.18, n.6, p.787-801.
- Friedel, L. (1979). Improved friction pressure drop correlations for horizontal and vertical two-phase pipe flow. In: European two-phase flow group meeting, Paper E, 1979, p.1979
- Friedel, L. (1985). Two-phase frictional pressure drop correlation for vertical downflow. **German chemical engineering**, v.8, n.1, p.32-40.
- Fujita, H. (1995). **Gas-Liquid Flows in Flat Channels with Small Channel Clearance Multiphase Flow 1995**.
- Fukano, T.; Kariyasaki, A. (1993). Characteristics of gas-liquid two-phase flow in a capillary tube. **Nuclear Engineering and Design**, v.141, n.1-2, p.59-68.
- Galbiati, L.; Andreini, P. (1992). Flow pattern transition for vertical downward two-phase flow in capillary tubes. Inlet mixing effects. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.19, n.6, p.791-799.
- Garcia, F. et al. (2003). Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines. **International Journal of Multiphase Flow**, v.29, n.10, p.1605-1624.
- Goda, H. et al. (2003). Drift-flux model for downward two-phase flow. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.46, n.25, p.4835-4844.
- Golan, L.; Stenning, A. (1969). Two-phase vertical flow maps. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings, 1969, SAGE Publications. p.108-114
- Griffith, P. (1963). The prediction of low-quality boiling voids. **Journal of Heat Transfer**, v.86, n.3, p.327-333.
- Grönnérud, R. (1979). Investigation of liquid hold-up, flow-resistance and heat transfer in circulation type evaporators, part iv: two-phase flow resistance in boiling refrigerants. **Bull. De l'Inst. Du Froid, Annexe**, v.1.
- Harirchian, T.; Garimella, S.V. (2010). A comprehensive flow regime map for microchannel flow boiling with quantitative transition criteria. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.53, n.13-14, p.2694-2702.
- Harmathy, T.Z. (1960). Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent. **AIChE Journal**, v.6, n.2, p.281-288.
- Hibiki, T.; Ishii, M. (2003). One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.46, n.25, p.4935-4948.
- Hibiki, T.; Mishima, K. (2001). Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical narrow rectangular channels. **Nuclear Engineering and Design**, v.203, n.2-3, p.117-131.
- Ide, H.; Fukano, T. (2005). Experimental research on the correlations of holdup and frictional pressure drop in air-water two-phase flow in a capillary rectangular channel. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.29, n.7, p.833-841.
- Ide, H.; Kariyasaki, A.; Fukano, T. (2007). Fundamental data on the gas-liquid two-phase flow in minichannels. **International Journal of Thermal Sciences**, v.46, n.6, p.519-530.
- Ishii, M. (1977). **One-dimensional drift-flux model and constitutive equations for relative motion between phases in various two-phase flow regimes** ANL-77-47; TRN: 78-011664 United States10.2172/6871478TRN: 78-011664Thu Mar 03 07:24:45 EST 2011Dep. NTIS, PC A05/MF A01.ANL; NTS-78-063259; ERA-03-042974; EDB-78-089809English.

- Jones Jr., O.C.; Zuber, N. (1975). The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v.2, n.3, p.273-306.
- Kabov, O.A.; Chinnov, E.A.; Cheverda, V. (2007). Two-phase flow in short rectangular mini-channel. **Microgravity Science and Technology**, v.19, n.3-4, p.44-47.
- Kaichiro, M.; Ishii, M. (1984). Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.27, n.5, p.723-737.
- Kandlikar, S.G.; Grande, W.J. (2003). Evolution of Microchannel Flow Passages--Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology. **Heat Transfer Engineering**, v.24, n.1, p.3-17.
- Kang, C.; Wilkens, R.; Jepson, W. (1996). The effect of slug frequency on corrosion in high pressure, inclined pipelines. **Corrosion/96, Paper**, n.20.
- Kanizawa, F.; Ribatski, G. (2014). A new void fraction predictive method based on minimum energy dissipation. **Int. J. Heat Fluid Flow**, (em revisão).
- Kanizawa, F.T. (2014). **Estudo teórico e experimental sobre padrões de escoamento, fração de vazio e perda de pressão durante escoamento bifásico água-ar cruzado ascendente externo a banco de tubos**. (Mestrado em Térmica e Fluidos) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- Kawahara, A.; Chung, P.M.Y.; Kawaji, M. (2002). Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel. **International Journal of Multiphase Flow**, v.28, n.9, p.1411-1435.
- Kew, P.A.; Cornwell, K. (1997). Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels. **Applied Thermal Engineering**, v.17, n.8, p.705-715.
- Kim, S.-M.; Mudawar, I. (2013). Universal approach to predicting two-phase frictional pressure drop for mini/micro-channel saturated flow boiling. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.58, n.1-2, p.718-734.
- Kim, S. et al. (2003). Interfacial structures and regime transition in co-current downward bubbly flow. In: ASME/JSME 2003 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference, 2003, American Society of Mechanical Engineers. p.1595-1606
- Kolev, N.I. (2005). **Multiphase Flow Dynamics 2: Thermal and Mechanical Interactions**. Springer Berlin Heidelberg.
- Lee, H.J.; Lee, S.Y. (2001). Pressure drop correlations for two-phase flow within horizontal rectangular channels with small heights. **International Journal of Multiphase Flow**, v.27, n.5, p.783-796.
- Li, H.-W. et al. (2014). Flow pattern map and time-frequency spectrum characteristics of nitrogen-water two-phase flow in small vertical upward noncircular channels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.54, n.0, p.47-60.
- Liebenberg, L.; Meyer, J.P. (2006). The characterization of flow regimes with power spectral density distributions of pressure fluctuations during condensation in smooth and micro-fin tubes. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.31, n.2, p.127-140.
- Lin, S. et al. (1991). Local frictional pressure drop during vaporization of R-12 through capillary tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v.17, n.1, p.95-102.
- Lockhart, R.W.; Martinelli, R.C. (1949). Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. **Chemical Engineering Progress symposium series**, v.45, p.pp. 39-48.
- Lombardi, C.; Carsana, C. (1992). Dimensionless pressure drop correlation for two-phase mixtures flowing upflow in vertical ducts covering wide parameter ranges. **Heat and Technology**, v.10, n.1, p.125-141.
- Lowry, B.; Kawaji, M. (1988). Adiabatic vertical two-phase flow in narrow flow channels. In: AIChE Symp. Ser, 1988, p.133-139
- Mandal, S.N.; Das, S.K. (2001). Pressure Losses in Bends during Two-Phase Gas-Newtonian Liquid Flow. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v.40, n.10, p.2340-2351.
- Mandhane, J.M.; Gregory, G.A.; Aziz, K. (1974). A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v.1, n.4, p.537-553.
- Massoud, M. (2005). **Engineering thermofluids**. Springer.

- Matsui, G. (1984). Identification of flow regimes in vertical gas-liquid two-phase flow using differential pressure fluctuations. **International Journal of Multiphase Flow**, v.10, n.6, p.711-719.
- Matsui, G. (1986). Automatic identification of flow regimes in vertical two-phase flow using differential pressure fluctuations. **Nuclear Engineering and Design**, v.95, n.0, p.221-231.
- Matsui, G.; Fujino, H.; Suzuki, M. (2007). Two-Phase Flow Sensing Using Differential Pressure Fluctuations. **Journal of the Japanese Society for Experimental Mechanics**, v.7, n.Special_Issue, p.s50-s55.
- McAdams, W.H.; Woods, W.K.; Bryan, R.L. (1942). Vaporization inside horizontal tubes-II-Benzene-oil mixtures. **Trans. ASME**, v.64, p.193.
- Mehendale, S.S.; Shah, R.K.; Jacobi, A.M. (2000). Fluid Flow and Heat Transfer at Micro- and Meso-Scales With Application to Heat Exchanger Design. **Applied Mechanics Reviews**, v.53, n.7, p.175-193.
- Milan, M.; Borhani, N.; Thome, J.R. (2013). Adiabatic vertical downward air–water flow pattern map: Influence of inlet device, flow development length and hysteresis effects. **International Journal of Multiphase Flow**, v.56, n.0, p.126-137.
- Mishima, K.; Hibiki, T. (1996). Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, v.22, n.4, p.703-712.
- Mishima, K.; Hibiki, T.; Nishihara, H. (1993). Some characteristics of gas-liquid flow in narrow rectangular ducts. **International Journal of Multiphase Flow**, v.19, n.1, p.115-124.
- Moreno Quibén, J.; Thome, J.R. (2007). Flow pattern based two-phase frictional pressure drop model for horizontal tubes, Part II: New phenomenological model. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.28, n.5, p.1060-1072.
- Moriyama, K.; Inoue, A.; Ohira, H. (1992). The Thermohydraulic Characteristics of Two-Phase Flow in Extremely Narrow Channels : The Frictional Pressure Drop and Void Fraction of Adiabatic Two-Component Two-Phase Flow. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series B**, v.58, n.546, p.401-407.
- Müller-Steinhagen, H.; Heck, K. (1986). A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v.20, n.6, p.297-308.
- O. C. Jones, J. (1976). An Improvement in the Calculation of Turbulent Friction in Rectangular Ducts. **Journal of Fluids Engineering**, v.98, n.2, p.173-180.
- Oliemans, R.V.A.; Pots, B.F.M.; Trompé, N. (1986). Modelling of annular dispersed two-phase flow in vertical pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v.12, n.5, p.711-732.
- Ong, C.L.; Thome, J.R. (2009). Flow boiling heat transfer of R134a, R236fa and R245fa in a horizontal 1.030 mm circular channel. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.33, n.4, p.651-663.
- Ong, C.L. (2011). Macro-to-microchannel transition in two-phase flow: Part 1 – Two-phase flow patterns and film thickness measurements. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.35, n.1, p.37-47.
- Oshinowo, T.; Charles, M.E. (1974). Vertical two-phase flow part I. Flow pattern correlations. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.52, n.1, p.25-35.
- Ould Didi, M.B.; Kattan, N.; Thome, J.R. (2002). Prediction of two-phase pressure gradients of refrigerants in horizontal tubes. **International Journal of Refrigeration**, v.25, n.7, p.935-947.
- Owens, T.N. (1961). Two-phase pressure drop gradient. **Inst. Dev. in heat transfer., v. Pt II, ASME, n.,** p.363-368.
- Padilla, M. et al. (2011). Two-phase pressure drop in return bends: Experimental results for R-410A. **International Journal of Refrigeration**, v.34, n.8, p.1854-1865.
- Permoli, A.; Di Francesco, D.; Prina, A. (1971). An emperical correlation for evaluating two phase mixture density under adiabatic conditions. **Paper presented at the European two phase flow group meeting Milan.**
- Qu, W.; Yoon, S.-M.; Mudawar, I. (2004). Two-Phase Flow and Heat Transfer in Rectangular Micro-Channels. **Journal of Electronic Packaging**, v.126, n.3, p.288-300.

- Revellin, R.; Thome, J.R. (2007). Experimental investigation of R-134a and R-245fa two-phase flow in microchannels for different flow conditions. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.28, n.1, p.63-71.
- Ribatski, G. (2013). A critical overview on the recent literature concerning flow boiling and two-phase flows inside micro-scale channels. **Experimental Heat Transfer**, v.26, n.2-3, p.198-246.
- Ribatski, G.; Wojtan, L.; Thome, J.R. (2006). An analysis of experimental data and prediction methods for two-phase frictional pressure drop and flow boiling heat transfer in micro-scale channels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.31, n.1, p.1-19.
- Rouhani, S.Z.; Axelsson, E. (1970). Calculation of void volume fraction in the subcooled and quality boiling regions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.13, n.2, p.383-393.
- Rouhani, S.Z.; Sohal, M.S. (1983). Two-phase flow patterns: A review of research results. **Progress in Nuclear Energy**, v.11, n.3, p.219-259.
- Sadatomi, M.; Ali, M.I.; Kawaji, M. (1992). Effects of Gap Width and Orientation on Two-Phase Flow in a Narrow Passage between Two-Flat Plates. **Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B**, v.58, n.546, p.408-415.
- Santoso, B. (2012). The Identification of Gas-liquid Co-current Two Phase Flow Pattern in a Horizontal Pipe Using the Power Spectral Density and the Artificial Neural Network (ANN). **Modern Applied Science**, v.6, n.9, p.56-67.
- Satitchaicharoen, P.; Wongwises, S. (2004). Two-phase flow pattern maps for vertical upward gas-liquid flow in mini-gap channels. **International Journal of Multiphase Flow**, v.30, n.2, p.225-236.
- Sempértegui-Tapia, D. (2011). **Estudo teórico-experimental dos padrões de escoamento durante a evaporação convectiva no interior de canais com diâmetro reduzido.** (Mestrado em Térmica e Fluidos) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- Serizawa, A.; Feng, Z.; Kawara, Z. (2002). Two-phase flow in microchannels. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.26, n.6-7, p.703-714.
- Shah, R.K.; London, A.L. (1978). **Laminar flow forced convection in ducts: a source book for compact heat exchanger analytical data.** Academic Press.
- Shah, R.K.; Sekulic, D.P. (2003). **Fundamentals of Heat Exchanger Design.** Wiley.
- Shedd, T.A. (2001). **Characteristics of the liquid film in horizontal two-phase flow** Air Conditioning and Refrigeration Center. College of Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Shen, X. et al. (2012). One-dimensional interfacial area transport of vertical upward bubbly flow in narrow rectangular channel. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.36, n.0, p.72-82.
- Silla, H. (2003). **Chemical Process Engineering: Design And Economics.** Taylor & Francis.
- Smith, S.L. (1969). Void fractions in two-phase flow: A correlation based upon an equal velocity head model. **Proc. Institution Mechanical Engineers**, v.184, p.647-657.
- Sowiński, F.; Dziubiński, M. (2008). Experimental Study on Gas-Viscous Liquid Mixture Flow Regimes and Transitions Criteria in Vertical Narrow Rectangular Channels. **Heat Transfer**, v.2, p.3755.
- Sowiński, J.; Dziubiński, M.; Fidos, H. (2009). Velocity and gas-void fraction in two-phase liquid-gas flow in narrow mini-channels. **Archives of Mechanics**, v.61, n.1, p.29-40.
- Spedding, P.L.; Chen, J.J.J. (1984). Holdup in two phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v.10, n.3, p.307-339.
- Spedding, P.L.; Nguyen, V.T. (1980). Regime maps for air water two phase flow. **Chemical Engineering Science**, v.35, n.4, p.779-793.
- Sun, L.; Mishima, K. (2009). Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini-channels. **International Journal of Multiphase Flow**, v.35, n.1, p.47-54.
- Suo, M.; Griffith, P. (1963). **Two phase flow in capillary tubes** DTIC Document.
- Taitel, Y.; Bornea, D.; Dukler, A.E. (1980). Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, v.26, n.3, p.345-354.
- Taitel, Y.; Dukler, A.E. (1976). A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, v.22, n.1, p.47-55.

- Taylor, B.N.; Kuyatt, C.E. (1994). Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results.
- Thom, J.R.S. (1964). Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.7, n.7, p.709-724.
- Tibiriçá, C.B. (2011). **Estudo teórico-experimental da transferência de calor e do fluxo crítico durante a ebulição convectiva no interior de microcanais**. 252 pp. (Tese de Doutorado em Térmica e Fluidos) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- Tibiriçá, C.B.; Ribatski, G. (2015). Flow boiling phenomenological differences between micro- and macro-scale channels. **Heat Transfer Engineering**, v.36, n.11.
- Tran, T.N. et al. (2000). Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: an experimental investigation and correlation development. **International Journal of Multiphase Flow**, v.26, n.11, p.1739-1754.
- Traviss, D.P.; Rohsenow, W.M. (1973). **The influence of return bends on the downstream pressure drop and condensation heat transfer in tubes** Cambridge, Mass.: MIT Heat Transfer Laboratory, [1973].
- Triplett, K.A. et al. (1999). Gas-liquid two-phase flow in microchannels Part I: two-phase flow patterns. **International Journal of Multiphase Flow**, v.25, n.3, p.377-394.
- Turner, J.M.; Wallis, G.B. (1965). **Two-phase flow and boiling heat transfer** Thayer School of Engineering, Dartmouth College, Hanover, N.H The separate-cylinders model of two-phase flow, Interim Report, NYO 3114-6 (EURAE-1415).
- Ullmann, A.; Brauner, N. (2007). THE PREDICTION OF FLOW PATTERN MAPS IN MINICHANNELS. v.19, n.1, p.49-73.
- Usui, K.; Sato, K. (1989). Vertically downward two-phase flow, (I) Void distribution and average void fraction. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v.26, n.7, p.670-680.
- Waelchli, S.; Rudolf Von Rohr, P. (2006). Two-phase flow characteristics in gas-liquid microreactors. **International Journal of Multiphase Flow**, v.32, n.7, p.791-806.
- Wallis, G.B. (1969). **One-dimensional two-phase flow**. McGraw-Hill.
- Wambsganss, M.W.; Jendzejczyk, J.A.; France, D.M. (1991). Two-phase flow patterns and transitions in a small, horizontal, rectangular channel. **International Journal of Multiphase Flow**, v.17, n.3, p.327-342.
- Wambsganss, M.W. et al. (1992). Frictional pressure gradients in two-phase flow in a small horizontal rectangular channel. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v.5, n.1, p.40-56.
- Whalley, P.B.; Hewitt, G.F. (1980). **Multiphase flow and pressure drop**, Heat Exchanger Design Handbook Hemisphere, Washington, DC.
- White, F.M. (2011). **Fluid Mechanics**. McGraw Hill.
- Wilmarth, T.; Ishii, M. (1994). Two-phase flow regimes in narrow rectangular vertical and horizontal channels. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.37, n.12, p.1749-1758.
- Winkler, J. et al. (2012). Void fractions for condensing refrigerant flow in small channels: Part I literature review. **International Journal of Refrigeration**, v.35, n.2, p.219-245.
- Wojtan, L.; Ursenbacher, T.; Thome, J.R. (2004). Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part I—A new diabatic two-phase flow pattern map. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.48, n.14, p.2955-2969.
- Woldesemayat, M.A.; Ghajar, A.J. (2007). Comparison of void fraction correlations for different flow patterns in horizontal and upward inclined pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v.33, n.4, p.347-370.
- Wölk, G.; Dreyer, M.; Rath, H.J. (2000). Flow patterns in small diameter vertical non-circular channels. **International Journal of Multiphase Flow**, v.26, n.6, p.1037-1061.
- Xiao, J.; Shonham, O.; Brill, J. (1990). A comprehensive mechanistic model for two-phase flow in pipelines. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1990, Society of Petroleum Engineers.

- Xing, D. et al. (2014). Effects of void fraction correlations on pressure gradient separation of air–water two-phase flow in vertical mini rectangular ducts. **Progress in Nuclear Energy**, v.70, n.0, p.84-90.
- Xiong, R.; Chung, J. (2006). Adiabatic Gas-Liquid Two-Phase Flow Patterns in Microchannels. In: ASME 2006 2nd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting Collocated With the 14th International Conference on Nuclear Engineering, 2006, American Society of Mechanical Engineers. p.575-582
- Xiong, R.; Chung, J.N. (2007). An experimental study of the size effect on adiabatic gas-liquid two-phase flow patterns and void fraction in microchannels. **Physics of fluids**, v.19, n.3, p.033301.
- Xu, J. (1999). Experimental study on gas–liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini gaps. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v.20, n.4, p.422-428.
- Yamaguchi, K.; Yamazaki, Y. (1984). Combined flow pattern map for cocurrent and countercurrent air-water flows in vertical tube. **Journal of Nuclear Science and Technology**, v.21, n.5, p.321-327.
- Yang, C.Y.; Webb, R.L. (1996). Friction pressure drop of R-12 in small hydraulic diameter extruded aluminum tubes with and without micro-fins. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.39, n.4, p.801-809.
- Yang, Z.C. et al. (2010). Nitrogen/non-Newtonian fluid two-phase upward flow in non-circular microchannels. **International Journal of Multiphase Flow**, v.36, n.1, p.60-70.
- Youguang, M. et al. (2010). Measurement and Correlation of Pressure Drop for Gas-Liquid Two-phase Flow in Rectangular Microchannels. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v.18, n.6, p.940-947.
- Yue, J.; Chen, G.; Yuan, Q. (2004). Pressure drops of single and two-phase flows through T-type microchannel mixers. **Chemical Engineering Journal**, v.102, n.1, p.11-24.
- Yue, J. et al. (2008). An experimental investigation of gas–liquid two-phase flow in single microchannel contactors. **Chemical Engineering Science**, v.63, n.16, p.4189-4202.
- Yue, J. (2009). An experimental study of air–water Taylor flow and mass transfer inside square microchannels. **Chemical Engineering Science**, v.64, n.16, p.3697-3708.
- Zeguai, S.; Chikh, S.; Tadrist, L. (2013). Experimental study of two-phase flow pattern evolution in a horizontal circular tube of small diameter in laminar flow conditions. **International Journal of Multiphase Flow**, v.55, n.0, p.99-110.
- Zhang, W.; Hibiki, T.; Mishima, K. (2007). Two Phase Frictional Pressure Drop in Mini-channel. In: 6th International Conference on Multiphase Flow, 2007, Leipzig, Germany. Leipzig, Germany:
- Zhang, W. (2010). Correlations of two-phase frictional pressure drop and void fraction in mini-channel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.53, n.1, p.453-465.
- Zhao, H.; Lee, K.; Freeston, D. (2000). Geothermal two-phase flow in horizontal pipes. In: Proceedings, World Geothermal Congress, 2000, p.3349-3353
- Zhao, J.; Liu, G.; Li, B. (2004). Two-phase flow patterns in a square mini-channel. **Journal of Thermal Science**, v.13, n.2, p.174-178.
- Zhao, Y. et al. (2013). Gas–liquid two-phase flow in microchannel at elevated pressure. **Chemical Engineering Science**, v.87, n.0, p.122-132.
- Zivi, S. (1964). Estimation of steady-state steam void-fraction by means of the principle of minimum entropy production. **Journal of Heat Transfer**, v.86, n.2, p.247-251.
- Zuber, N.; Findlay, J.A. (1965). Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow Systems. **Journal of Heat Transfer**, v.87, n.4, p.453-468.

ANEXOS

APÊNDICE A

Neste capítulo se ilustra na Fig. A.1 a interface desenvolvida no programa Labview 12.0 para operar o aparato experimental. Também, é apresentado o programa desenvolvido na Fig. A.2.

Figura A.1 Interface do programa para aquisição de dados e monitoramento do aparato experimental.

Figura A.2 Programa para aquisição de dados em LabView 12.0.

APÊNDICE B

ESCOAMENTO MONOFÁSICO

Neste capítulo se apresentam os conceitos básicos e correlações para escoamento monofásico em dutos retangulares. Considere-se o caso em que o movimento das partículas do fluido seja ordenado, com deslocamento em camadas ou laminas e sem flutuações, tal situação é denominada de escoamento em regime laminar ou viscoso. Quando a velocidade do fluido é tal que as flutuações de velocidade resultam em movimentos das partículas aleatórios e desordenado, diz-se que o regime é turbulento. Para condições praticas, adota-se que a transição em tubos circulares ocorre para um número de Reynolds crítico:

$Re < 2.300$	Escoamento laminar
$2.300 < Re < 4.000$	Escoamento de transição
$Re > 4.000$	Escoamento turbulento

A diferença de pressão depende do regime do escoamento. Quando à diferença de pressão é exclusiva de efeitos viscosos ocorre uma perda irreversível de pressão denominada de perda de pressão. A Eq. (B.1) expressa à diferença de pressão para todos os tipos de escoamento completamente desenvolvido ao interior de dutos (circulares não circulares, em regime laminar ou turbulento).

$$\Delta P = 2f \frac{L}{D_H} \rho u_m^2 \quad (\text{B.1})$$

onde u_m é a velocidade media na seção. Normalmente, os métodos de previsão de perda de pressão em canais retangulares são baseados em soluções para tubos circulares. Alguns dos métodos comunmente usados para determinar o fator de atrito f são: para $Re < 2.300$ solução teórica de Hagen-Poiseuille Eq. (B.2), para $Re > 4.000$ a correlação de Blasius Eq. (B.3), para $Re > 2.300$ a correlação de Colebrook White Eq. (B.4) e a correlação de Churchill Eq. (B.5) para toda a faixa de Reynolds.

$$f = \frac{16}{Re} \quad (\text{B.2})$$

$$f = \frac{0,079}{Re^{0,25}} \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re} \right) \quad (\text{B.4})$$

$$f = -2 \left[\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{\left\{ 2,457 \ln \left[\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0,9} + 0,27 \left(\frac{\varepsilon}{D} \right) \right]^{-1} \right\}^{16} + \left(\frac{37.530}{\text{Re}} \right)^{16}} \right]^{1/12} \quad (\text{B.5})$$

Uma prática comum é utilizar o diâmetro hidráulico nas Eq. (B.1) a (B.5). White (2011) reporta erro de $\pm 40\%$ em regime laminar e $\pm 15\%$. Métodos específicos para canais retangulares que foram desenvolvidos são resumidos na Tab. B.1, onde o fator de forma ω é sempre definido menor que 1.

Tabela B.1 Fator de Atrito tipo Fanning em escoamento desenvolvido.

Autor	Correlação	Observações
White (2011) e Çengel e Cimbala (2008)	$f = \frac{Po(\omega)}{\text{Re}}$	Re < 2.300 Onde Po fator geométrico Po é dado na Tab. 8.2.
Thirunarayanan e Ramachandran (1965)	$f = \frac{14,227 + 1.402,5}{\text{Re}} \left(\frac{1 + \omega(\sqrt{2} - 1)}{4(1 + \omega)} - \frac{\sqrt{2}}{8} \right)$	Re < 2.300
Shah e London (1978)	$f = 24 \text{Re}^{-1} \left(\begin{array}{l} 1 - 1,3553\omega + 1,9467\omega^2 \\ -1,7012\omega^3 + 0,9564\omega^4 \\ -0,2537\omega^5 \end{array} \right)$	Re < 2.300
Eq. (B.1) e (B.2) utilizando		
O. C. Jones (1976)	$\text{Re}^* = \frac{GD_H}{\mu} \psi$	-
	$\psi \cong \frac{2}{3} + \frac{11}{24} \omega(2 - \omega)$	
Bhatti and Shah (1987)	$f = A + B \cdot \text{Re}^{\frac{-1}{m}}$ $A = 0,00128, B = 0,1143, m = 3,2154$	2.100 < Re < 4.000
Bhatti and Shah (1987)	$f = A + B \cdot \text{Re}^{\frac{-1}{m}}$ $A = 0,0054, B = 2,3 \times 10^{-8}, m = -\frac{2}{3}$	Re > 4.000
Shah e Sekulic (2003)	$f = 0,0791 \text{Re}^{-0,25} (1,0875 - 0,1125\omega)$	Re > 4.000

Tabela B.2 Valores de $C(\omega)$. Fator geométrico Po.

Relação de Aspecto ω	White (2011)	Çengel e Cimbala (2008)
1,00	14,23	14,2275
0,75	-	14,4725
0,50	15,55	15,5475
0,40	-	16,3675
0,333	17,09	-
0,25	18,23	18,2325
0,167	19,7	19,7025
0,125	20,25	20,585
0,10	-	21,17
0,05	-	22,4775
0,00	24	24

Para canais inclinados é necessário incluir a componente do peso do fluido na direção do escoamento. A diferença total de pressão ao longo de um canal de comprimento L é:

$$\Delta P_{TOTAL} = \Delta P_{ATRITO} + \rho g L \sin \phi \quad (\text{B.6})$$

onde ϕ é o ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal.

APÊNDICE C

Tabela C.1 Dispositivos para geração de escoamento bifásico

Autor	D_H [mm]	Orientação	Fluidos	Misturador	Esquema	Parâmetro de estudo
Wambsganss et al. (1991) Wambsganss et al. (1992)	5,4	H H, A	Água/ Ar	Meio poroso		ΔP , α , PE
Mishima et al. (1993)	2 4,6 8,9	A	Água/ Ar	Câmara de mistura com bocais de injeção		PE, ΔP , α , u_B
Wilmarth e Ishii (1994)	1,9 1,9 3,53	A A H	Água/ Ar	Câmara de mistura com meio poroso		PE, ΔP , u_B

Tabela C.1 (Continuação) Dispositivos para gerar escoamento bifásico

Autor	D_H [mm]	Orientação	Fluidos	Misturador	Esquema	Parâmetro de estudo
Coleman e Garimella (1999)	5,36	H	Água/ Ar	União + Câmara de mistura		PE
Triplett et al. (1999)	1 1,45	H	Água/ Ar	Injeção radial de Ar		PE, ΔP
Xu (1999)	1,85 1,14 0,59	A	Água/ Ar	Câmara de mistura		PE
Wölk et al. (2000)	6,1 5,9 5,9	A	Água/ Ar	Meio poroso Ajustável		PE
Lee e Lee (2001)		H	Água/ Ar	Meio poroso		ΔP

Tabela C.1 (Continuação) Dispositivos para gerar escoamento bifásico

Autor	D_H [mm]	Orientação	Fluidos	Misturador	Esquema	Parâmetro de estudo
Kawahara et al. (2002)	0,1 0,05-0,526	H	Água/ N_2	Injeção radial de Ar		PE, ΔP
Qu et al. (2004)	0,677	H	Água/ N_2	Meio poroso		PE
Satitchaicharoen e Wongwises (2004)	1,95 / 3,81 5,58 3,64 3,87	A	Água/ Ar	Câmara de mistura com meio poroso		PE
Ide e Fukano (2005)	1,98	A H	Água/ Ar	Câmara de mistura com Injeção radial de Ar a 120°		PE, ΔP
Waelchli e Rudolf Von Rohr (2006)	0,1875 0,218 0,210	H	Água/ N_2	União + Pinos/ Obstáculos		PE

Tabela C.1 (Continuação) Dispositivos para gerar escoamento bifásico

Autor	D _H [mm]	Orientação	Fluidos	Misturador	Esquema	Parâmetro de estudo
Xiong e Chung (2007)	0,21	H	Água/ N ₂	Agulha de Injeção		PE, ΔP, α,
	0,41					
	0,62					
Yue et al. (2009)	0,2	H	Água/ Ar	União		PE, ΔP
	0,4					
Chen et al. (2002)	1	H	Água/ N ₂	Agulha de Injeção		PE, ΔP
	1,5					
	4,5					
Youguang et al. (2010)	0,13	H	Água/ Ar	União		ΔP
	0,16					
	0,17					
	0,19					

Tabela C.1 (Continuação) Dispositivos para gerar escoamento bifásico

Autor	D_H [mm]	Orientação	Fluidos	Misturador	Esquema	Parâmetro de estudo
Choi et al. (2011a)	0,490 0,507	H	Água/ N_2	União		PE, ΔP
Zeguai et al. (2013)	3	H	Água/ Ar	Agulha de Injeção		PE
Milan et al. (2013)	8,8	D	Água/ Ar	Câmara de Mistura		PE