

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS
NÚCLEO DE ESCOAMENTO MULTIFÁSICO**

ANA LUIZA BELTRÃO SANTANA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO GRADIENTE DE PRESSÃO DE
UM ESCOAMENTO BIFÁSICO HORIZONTAL AR-ÁGUA EM
TUBOS CORRUGADOS**

DISSERTAÇÃO

**CURITIBA
2019**

ANA LUIZA BELTRÃO SANTANA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO GRADIENTE DE PRESSÃO DE
UM ESCOAMENTO BIFÁSICO HORIZONTAL AR-ÁGUA EM
TUBOS CORRUGADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica - Área de concentração: Engenharia Térmica.

Orientador: Prof. Dr. Moisés Alves Marcelino Neto

Coorientador: Prof. Dr. Rigoberto E. M. Morales

**CURITIBA
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Santana, Ana Luiza Beltrão

Análise experimental do gradiente de pressão de um escoamento bifásico horizontal ar-água em tubos corrugados / Ana Luiza Beltrão Santana.-- 2019.
1 arquivo de texto (108 f.) : PDF ; 58,5 MB

Disponível em World Wide Web

Texto em português com resumo em inglês

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2019.

Bibliografia: p. 74-77

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Engenharia térmica. 3. Escoamento em golfadas 4. Indústria petrolífera. 5. Gradiente de pressão. 6. Métodos de simulação. I. Marcelino Neto, Moisés Alves, orient. II. Melgarejo Morales, Rigoberto Eleazar, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, inst. IV. Título.

CDD: 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Lucia Ferreira Littiere – CRB 9/1271

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 356

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Análise experimental do gradiente de pressão de um escoamento bifásico horizontal ar-água em tubos corrugados**, defendida em sessão pública pela Candidata **Ana Luiza Beltrão Santana**, no dia 26 de março de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração: Engenharia Térmica, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais – PPGEM.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Moisés Alves Marcelino Neto - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Paulo Henrique Dias dos Santos - UTFPR

Prof. Dr. Marcelo Risso Errera - UFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, ____ de _____ de 20__.

Carimbo e assinatura do Coordenador do Programa

Agradecimentos

Aos meus pais, Geraldo e Iracema, a minha avó Lúcia Maria, ao meu tio Edson e aos meus irmãos, Luís Henrique e Lucas, pelo apoio e compreensão durante todo o período do meu mestrado.

Aos Professores Moisés A. Marcelino Neto e Rigoberto E. M. Morales pela orientação, confiança, conhecimento compartilhado e pela amizade construída durante o período de realização deste trabalho.

A equipe do NUEM, em especial ao técnico Reinaldo pela imensa ajuda na usinagem dos tubos corrugados, montagem da bancada experimental, suporte na realização dos testes experimentais e por todo empenho e dedicação na execução de suas atividades, aos técnicos em usinagem Carlos Silvano e Alex, ao Eng. Gabriel Torelli e ao estagiário em informática Bruno.

Aos Pesquisadores do NUEM, Cristiane Cozin, Henrique Stel, Rafael Fabrício e em especial ao Dalton Berdoldi por toda dedicação, apoio para realização deste trabalho e suporte nos processos burocráticos de compra de materiais.

Aos meus colegas de laboratório, Bruna Naidek, Carlos Bassani, Celine Kakitani, Daniela Marques, Hedilberto Barros, Gino Dextre, Jhoan Cubas, José Carlos, Luiz Lino e Rômulo Rodrigues, pelos conhecimentos compartilhados, discussões, sugestões e pela amizade.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e a Petrobras pelo suporte financeiro.

Toda decisão acertada é proveniente de uma experiência. E toda experiência é proveniente de uma decisão não acertada. (Albert Einstein)

Resumo

SANTANA, Ana Luiza Beltrão. Análise experimental do gradiente de pressão de um escoamento bifásico ar-água em tubos corrugados. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A indústria petrolífera utiliza tubos flexíveis em suas linhas de produção devido às suas características estruturais de baixa rigidez à flexão, o que facilita o processo de instalação quando comparados aos tubos rígidos. Os tubos flexíveis são compostos por várias camadas de materiais metálicos e não metálicos onde cada camada tem uma função específica. A camada mais interna dos tubos flexíveis, conhecida como camada intertravada ou camada corrugada, possui cavidades que são espaçadas entre si por uma distância constante e são essas cavidades que são responsáveis pelas características de flexibilidade desses tubos. A presença das cavidades nos tubos flexíveis proporciona alterações dinâmicas no escoamento, como por exemplo, alterações no gradiente de pressão, que é um parâmetro essencial para o projeto e dimensionamento de equipamentos, e necessita de predições confiáveis. Estudos presentes na literatura avaliam o gradiente de pressão para o escoamento bifásico em tubos lisos, contudo existe uma carência de estudos para o escoamento bifásico em tubos corrugados com diferentes características geométricas de cavidade. Neste cenário, o presente trabalho desenvolveu um estudo experimental para avaliar a influência da largura das cavidades de tubos corrugados com diferentes diâmetros internos no gradiente de pressão de um escoamento horizontal bifásico ar-água no padrão de escoamento golfadas, à temperatura e pressão ambiente. Foram utilizados três diferentes diâmetros internos de tubulação (26, 40,8 e 50 mm) e três larguras de cavidades (1,2, 1,6 e 2,0 mm). Observou-se que o gradiente de pressão do escoamento bifásico ar-água aumenta com o aumento da largura das cavidades do tubo corrugado e, a partir de uma regressão dos dados experimentais, uma nova correlação para o fator multiplicador de Lockhart e Martinelli foi proposta. A correlação possui uma concordância satisfatória, com desvios percentuais médios de 10% quando comparados contra os dados experimentais.

Palavras Chaves: Gradiente de pressão. Tubo corrugado. Escoamento em golfadas. Largura da cavidade. Fator multiplicador de Lockhart-Martinelli.

Abstract

SANTANA, Ana Luiza Beltrão. Experimental analysis of horizontal air-water two-phase flow pressure drop in corrugated pipe. 2019. 108 f. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Corrugated pipes have periodic cavities on inner wall that provide piping flexibility and dynamic changes in the flow. Oil and gas offshore production lines consist of corrugated pipes and the most observed flow pattern in these lines is slug flow. The pressure drop is an important project requirement for facilities design, safe operations and must be predicted quickly and reliably. Some studies proposed correlations to predict the pressure drop for slug flow in smooth pipes. However, limited research has evaluated the slug flow pressure drop in corrugated pipes. This work carried out an experimental analysis of horizontal air-water slug flow pressure drop in three different inner diameters (26, 40 and 50 mm ID) with three distinct cavities width (1.2, 1.6 and 2 mm). The effects of inner diameter and cavity width on slug flow pressure drop were analyzed. The results demonstrated that the increase of the cavities width in corrugated pipe increases the pressure drop. The experimental data were fitted and a pressure drop multiplier correlation was proposed. Comparison between predictions and experimental data showed 10% accuracy.

Key Words: Two-phase pressure drop. Corrugated pipes. Slug flow. Cavities width. Multiplier of Lockhart-Martinelli.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Representação dos tipos de cavidades, onde w e h são a largura e a altura da cavidade, respectivamente. (a) Cavidade do “tipo d” e (b) Cavidade do “tipo k”.	22
Figura 2 – Tubo flexível utilizado nas linhas de produção da indústria de petróleo.	23
Figura 3 – Representação esquemática de uma estrutura de extração de petróleo <i>offshore</i>	24
Figura 4 – Mapa de padrões de escoamento bifásico ar-água horizontal, para tubulação com 26 mm de diâmetro interno, obtido a partir do modelo proposto por Taitel e Dukler (1976).	27
Figura 5 – Representação esquemática da célula unitária de um escoamento líquido-gás em golfadas.	28
Figura 6 – Fator multiplicador em função do parâmetro X	32
Figura 7 – Representação geométrica dos tubos corrugados.	36
Figura 8 – Representação das geometrias, com dimensões em mm, dos tubos corrugados com diferentes tipos de geometria de cavidade. (a) Circular, (b) Retangular e (c) Trapezoidal.	37
Figura 9 – Representação esquemática dos tubos corrugados.	38
Figura 10 – Comportamento das linhas de corrente para um escoamento monofásico, a partir de simulação numérica, em tubos corrugados com diferentes larguras de cavidade.	39
Figura 11 – Distribuição do coeficiente de pressão em diferentes larguras de cavidade.	39
Figura 12 – Representação esquemática do tubo corrugado em U.	40
Figura 13 – Tubos corrugados com cavidade do “tipo d” de diferentes diâmetros internos (26, 40,8 e 50 mm) fabricados com as larguras de cavidade 1,2, 1,6 e 2,0 mm.	43
Figura 14 – Representação esquemática de um tubo corrugado com cavidades do “tipo d” helicoidalmente distribuídas. Fonte: Do autor.	44
Figura 15 – Representação esquemática do circuito experimental.	45
Figura 16 – Combinação das velocidades superficiais das fases utilizadas neste trabalho plotadas sobre o mapa de padrão de escoamento ar-água proposto por Taitel e Dukler (1976) para os diferentes diâmetros internos de tubulação. Linha azul: T26, Linha laranja: T40 e Linha verde: T50.	47

Figura 17 – Fator de atrito para um escoamento monofásico de água em tubulações lisas de diferentes diâmetros internos em relação ao número de Reynolds.	53
Figura 18 – Gradiente de pressão de um escoamento monofásico com água em tubulações lisas e corrugadas de diferentes diâmetros internos e larguras de cavidade. (a) T26 , (b) T40 (c) T50, (d) Todas as configurações de tubulação.	55
Figura 19 – Fator de atrito em função do número de Reynolds para as diferentes configurações de tubos corrugados. (a) T26, (b) T40 e (c) T50.	56
Figura 20 – Resultados experimentais para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação lisa com diferentes diâmetros.	58
Figura 21 – Comparação do gradiente de pressão bifásico em tubulação lisa com o gradiente de pressão calculado pela correlação de Lockhart-Martinelli.	59
Figura 22 – Gradiente de pressão bifásico experimental para tubulação corrugada com diferentes diâmetros internos e diferentes larguras de cavidade. (a) T26, (b) T40, (c) T50 e (d) Todas as configurações de tubulação.	60
Figura 23 – Imagens para o escoamento bifásico ar-água no padrão golfadas na tubulação com diâmetro interno de 26 mm. (a) Tubulação lisa (TL26), (b) Tubulação corrugada com $w=1,2$ mm (TC26-1,2).	61
Figura 24 – Imagens para o escoamento bifásico ar-água no padrão golfadas na tubulação com diâmetro interno de 50 mm. (a) Tubulação lisa (TL50), (b) Tubulação corrugada com $w=1,2$ mm (TC50-1,2).	61
Figura 25 – Fator multiplicador do gradiente de pressão de um escoamento bifásico em relação ao parâmetro de Lockhart-Martinelli para os diferentes diâmetros de tubulação. (a) T26, (b) T40 e (c) T50.	63
Figura 26 – Fator multiplicador do gradiente de pressão de um escoamento bifásico em relação ao parâmetro de Lockhart-Martinelli para tubulação lisa e tubulação corrugada de diferentes configurações geométricas. (a) TLD, (b) TCD-1,2, (c) TCD-1,6 e (d) TCD-2,0.	64
Figura 27 – Fator multiplicador do gradiente de pressão de um escoamento bifásico em relação ao parâmetro de Lockhart-Martinelli para tubulações lisas e corrugadas.	65
Figura 28 – Comparação entre o gradiente de pressão experimental de um escoamento bifásico em tubos corrugados com a predição pela equação de Lockhart e Martinelli.	66
Figura 29 – Comparação entre os resultados experimentais com a predição calculada com a correlação proposta por Naidek <i>et al.</i> (2017).	67

Figura 30 – Fator multiplicador devido aos efeitos das cavidades do tubo corrugado em relação ao parâmetro de Lockhart e Martinelli. (a) TC26-w, (b) TC40-w, (c) TC50-w e (d) Todas as configurações de TC.	68
Figura 31 – PDF dos fatores multiplicadores devido à inserção das cavidades. (a) TCD-1,2, (b) TCD-1,6, (c) TCD-2,0 e (d) Todas as configurações de TC.	70
Figura 32 – Fator multiplicador corrugado. (a) em função de w/D e (b) em função de d/D	71
Figura 33 – Comparação dos dados experimentais com a correlação proposta nesse estudo.	72
Figura 34 – Aparato de usinagem utilizado para fabricação dos tubos corrugados.	79
Figura 35 – Ferramentas de aço rápido com 10% de colbato, larguras de 1,2, 1,6 e 2 mm, utilizadas no processo de usinagem dos tubos corrugados.	80
Figura 36 – Suportes fabricados em poliacetal utilizados para fixação das ferramentas de cortes.	80
Figura 37 – Processo de fabricação dos tubos corrugados.	81
Figura 38 – Tubo corrugado após o processo de usinagem.	81
Figura 39 – Diferentes características geométricas dos tubos corrugados usinados neste trabalho.	82
Figura 40 – Reprodução (molde) do formato das cavidades usinadas nos tubos corrugados para verificação da forma geométrica da cavidade.	82
Figura 41 – Processo de usinagem de um tubo de acrílico extrudado com não uniformidade devido à grande variação de espessura de parede.	83
Figura 42 – Processo de usinagem em tubo de acrílico extrudado com extensões sem remoção de material.	84
Figura 43 – Imperfeições nas bordas das cavidades usinadas.	84
Figura 44 – Cavaco encrustado na ponta da ferramenta de corte.	84
Figura 45 – Repetitividade do fator de atrito para o escoamento monofásico de água nas diferentes tubulações lisas.	97
Figura 46 – Medidas experimentais para o gradiente de pressão bifásico de um escoamento bifásico em tubulação corrugada de diâmetro interno de 26 mm para as três diferentes larguras de cavidade.	98
Figura 47 – Medidas experimentais para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada de diâmetro interno de 40,8 mm para as três diferentes larguras de cavidade.	99

Figura 48 – **Medidas experimentais para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada de diâmetro interno de 50 mm para as três diferentes larguras de cavidade. 100**

Lista de tabelas

Tabela 1 –	Coefficiente de Chisholm (1967) - C.	33
Tabela 2 –	Dimensões das características geométricas das cavidades dos tubos corrugados.	41
Tabela 3 –	Dimensões das características geométricas das cavidades dos tubos corrugados.	44
Tabela 4 –	Características do circuito e testes experimentais.	48
Tabela 5 –	Características da instrumentação utilizada na bancada experimental.	49
Tabela 6 –	Combinações de velocidades superficiais das fases e tempos de aquisição dos dados experimentais bifásicos.	52
Tabela 7 –	Características geométricas das cavidades das tubulações corrugadas.	55
Tabela 8 –	Fator multiplicador corrugado para as distintas configurações de tubulação corrugada.	69
Tabela 9 –	Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC26-1,2).	86
Tabela 10 –	Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC26-1,6).	87
Tabela 11 –	Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC26-2,0).	88
Tabela 12 –	Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC40-1,2).	89
Tabela 13 –	Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC40-1,6).	90
Tabela 14 –	Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC40-2,0).	91
Tabela 15 –	Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC50-1,2).	92

Tabela 16 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC50-1,6).	93
Tabela 17 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC50-2,0).	94
Tabela 18 – Incertezas de medição para o fator de atrito do escoamento monofásico em tubulação lisa com diâmetro interno de 26 mm (TL26).	95
Tabela 19 – Incertezas de medição para o fator de atrito do escoamento monofásico em tubulação lisa com diâmetro interno de 40 mm (TL40).	95
Tabela 20 – Incertezas de medição para o fator de atrito do escoamento monofásico em tubulação lisa com diâmetro interno de 50 mm (TL50).	96
Tabela 21 – Incertezas das medições do diâmetro interno da tubulação e do comprimento da seção de testes.	96
Tabela 22 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC26-1,2).	101
Tabela 23 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC26-1,6).	102
Tabela 24 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC26-2,0).	103
Tabela 25 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC40-1,2).	104
Tabela 26 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC40-1,6).	105
Tabela 27 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC40-2,0).	106
Tabela 28 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC50-1,2).	107

Tabela 29 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com di- âmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC50-1,6).	108
Tabela 30 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com di- âmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC50-2,0).	109

Lista de abreviaturas e siglas

CGA	Coriolis de gás de altas vazões
CGB	Coriolis de gás de baixas vazões
CLA	Coriolis de líquido de altas vazões
CLB	Coriolis de líquido de baixas vazões
PDF	Função probabilidade de densidade
PVC	Policloreto de vinil
TC	Tubo corrugado
TCD	Tubo corrugado com diâmetro interno de D mm
TCD-w	Tubo corrugado com diâmetro interno de D mm e largura das cavidades de w mm
TD	Tubo com diâmetro interno de D mm
TL	Tubo liso
TLD	Tubo liso com diâmetro interno de D mm
TPA	Transdutor de pressão absoluta
TPD	Transdutor de pressão diferencial
TPM	Transdutor de pressão manométrica
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Lista de símbolos

A	Área da seção transversal da tubulação [m^2]
C	Coefficiente proposto por Chisholm (1967) para o fator multiplicador de Lockhart-Martinelli [-]
$C_{1,p,q}$	Constantes obtidas por regressão dos dados experimentais [-]
$\left. \frac{dP}{dL} \right _{\psi}$	Gradiente de pressão para a fase em um escoamento bifásico [Pa/m]
$\left. \frac{dP}{dL} \right _{LG}$	Gradiente de pressão para um escoamento bifásico líquido-gás [Pa/m]
$\left. \frac{dP}{dL} \right _{S\psi}$	Gradiente de pressão para a fase em um escoamento monofásico [Pa/m]
D_h	Diâmetro hidráulico [m]
D	Diâmetro interno da tubulação [m]
E, F, H	Parâmetros adimensionais [-]
$f_{Blasius}$	Fator de atrito para tubos lisos calculado a partir da equação de Blasius [-]
f_{exp}	Fator de atrito de experimental [-]
f_M	Fator de atrito de Moody [-]
Fr	Número de Froude [-]
f_{Stel}	Fator de atrito para escoamento monofásico em tubulação corrugada proposto por Stel <i>et al.</i> (2012) [-]
G_m	Fluxo mássico da mistura bifásica [kg/m^2s]
G_{MH}	Fator proposto por Muller-Steinhagen e Heck (1986)
h	Altura da cavidade da tubulação corrugada [mm]
H_L	<i>Holdup</i> ou fração de líquido [-]
J_{ψ}	Velocidade superficial da fase [m/s]

J_m	Velocidade da mistura [m/s]
L	Comprimento da tubulação [m]
$\dot{m}_\psi$	Vazão mássica da fase [kg/s]
q_ψ	Vazão volumétrica da fase [m^3/s]
P	Pressão na entrada da seção de testes [Pa]
P_{atm}	Pressão atmosférica [Pa]
R	Constante do ar [J/kgK]
t	Tempo de aquisição dos dados experimentais [s]
T_ψ	Temperatura da fase [°C]
Re_ψ	Número de Reynolds da fase [-]
w	Largura da cavidade do tubo corrugado [mm]
We	Número de Weber [-]
x	Título de vapor [-]
X	Parâmetro de Lockhart-Martinelli [-]
v_ψ	Velocidade local da fase [m/s]

Letras Gregas

ΔP	Pressão diferencial [Pa/m]
ϵ/D	Rugosidade relativa da tubulação [-]
ρ_ψ	Massa específica da fase [kg/m^3]
ρ_{NS}	Massa específica de não deslizamento da mistura bifásica [kg/m^3]
σ_m	Tensão superficial da mistura bifásica
λ_L	Fração de líquido de não deslizamento [-]
$\phi^2 _L$	Fator multiplicador do gradiente de pressão bifásico de Lockhart-Martinelli [-]
μ_ψ	Viscosidade dinâmica da fase [Pas]
ν_ψ	Viscosidade cinemática da fase [m^2/s]

Subíndice

G	Representação da fase gasosa
go	Representação da fase gasosa que escoar sozinha na tubulação com fluxo mássico da mistura.
L	Representação da fase líquida
lo	Representação da fase líquida que escoar sozinha na tubulação com fluxo mássico da mistura.
ψ	Letra grega utilizada para representar as fases líquida ou gasosa ($\psi = L; G$)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVO	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1	ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	26
2.2	GRADIENTE DE PRESSÃO EM UM ESCOAMENTO BIFÁSICO	28
2.2.1	Modelo Homogêneo	28
2.2.2	Modelo de Lockhart-Martinelli	29
2.2.3	Estudos Sobre o escoamento em Tubos Lisos	32
2.2.4	Estudos Sobre o escoamento em Tubos Corrugados	36
2.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	41
3	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	43
3.1	FABRICAÇÃO DOS TUBOS CORRUGADOS	43
3.2	CIRCUITO EXPERIMENTAL	44
3.3	PROCEDIMENTOS E ETAPAS EXPERIMENTAIS	49
3.3.1	Validação do Procedimento Experimental	53
4	RESULTADOS	54
4.1	TESTES PARA O ESCOAMENTO MONOFÁSICO	54
4.2	TESTES PARA O ESCOAMENTO BIFÁSICO	57
4.2.1	Escoamento em Tubos Lisos	58
4.2.2	Escoamento em Tubos Corrugados	59
4.2.3	Comparação dos Resultados Experimentais com Correlações da Literatura	65
4.3	ANÁLISE DO FATOR MULTIPLICADOR CORRUGADO	68
5	CONCLUSÕES	73
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
	REFERÊNCIAS	75
	APÊNDICE A – USINAGEM DOS TUBOS CORRUGADOS	79
A.1	DIFICULDADES ENCONTRADAS DURANTE O PROCESSO DE USINAGEM DOS TUBOS CORRUGADOS	83
	APÊNDICE B – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	85
B.1	PROPAGAÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO	94

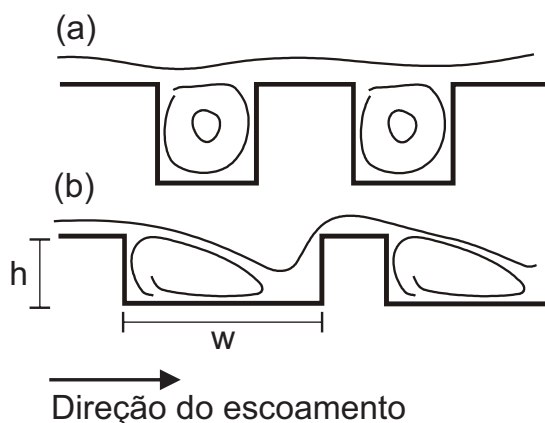
APÊNDICE C – REPETITIVIDADE DOS TESTES EXPERIMENTAIS	97
APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	101

1 INTRODUÇÃO

Os tubos corrugados são dutos que possuem, em sua parede interna ou externa, cavidades que podem ter diferentes formatos e tamanhos e são espaçadas entre si por uma distância constante. Esses tubos são utilizados em diversas aplicações industriais, como em trocadores de calor e em tubulações flexíveis na produção de petróleo.

Perry *et al.* (1969) propuseram uma denominação para a geometria das cavidades dos tubos corrugados que classifica essas cavidades em relação à largura das mesmas (w), região que está exposta ao escoamento como pode ser observado na Figura 1. Para os autores, as cavidades com geometria aproximadamente quadradas são denominadas como cavidades do “tipo d”, já as cavidades com geometria aproximadamente retangular, com a largura (w) muito maior que a altura (h),¹ são denominadas de cavidades “tipo k”.

Figura 1 – Representação dos tipos de cavidades, onde w e h são a largura e a altura da cavidade, respectivamente. (a) Cavidade do “tipo d” e (b) Cavidade do “tipo k”.



Fonte: Adaptado de Jiménez (2004).

O uso de tubos corrugados pode ter influências diretas no escoamento e gerar mudanças na magnitude de alguns parâmetros. Por exemplo, existem aplicações nas quais tubos corrugados são utilizados em trocadores de calor, uma vez que esses tubos proporcionam aumento significativo de transferência de calor, são de fácil instalação e permitem reduções das dimensões do equipamento. No entanto, o aumento de outros parâmetros do escoamento como, por exemplo, o fator de atrito, passa a ser uma preocupação de projeto na avaliação de desempenho de trocadores de calor que utilizam tubos corrugados

¹ Jiménez (2004) estabeleceu que as cavidades com largura (w) igual a três (ou quatro) vezes a altura (h) ($w=3h$ ou $w=4h$) é classificada como do “tipo k”.

ou em outros equipamentos nos quais esses tubos são aplicados como função estrutural (AZEVEDO, 2010).

Um outro exemplo de aplicabilidade de tubulação corrugada são os tubos flexíveis, Figura 2, utilizados pela indústria petrolífera em suas linhas de produção *offshore*. Os tubos flexíveis são compostos por várias camadas de materiais metálicos e não metálicos, cada camada com uma função específica, onde a camada mais interna do tubo é conhecida como carcaça corrugada ou intertravada devido ao fato da mesma ser composta por cavidades periodicamente distribuídas. As cavidades são responsáveis por proporcionar flexibilidade para toda a composição de multicamadas de um tubo flexível².

Figura 2 – Tubo flexível utilizado nas linhas de produção da indústria de petróleo.



Fonte: Adaptado de Petrobras (2015).

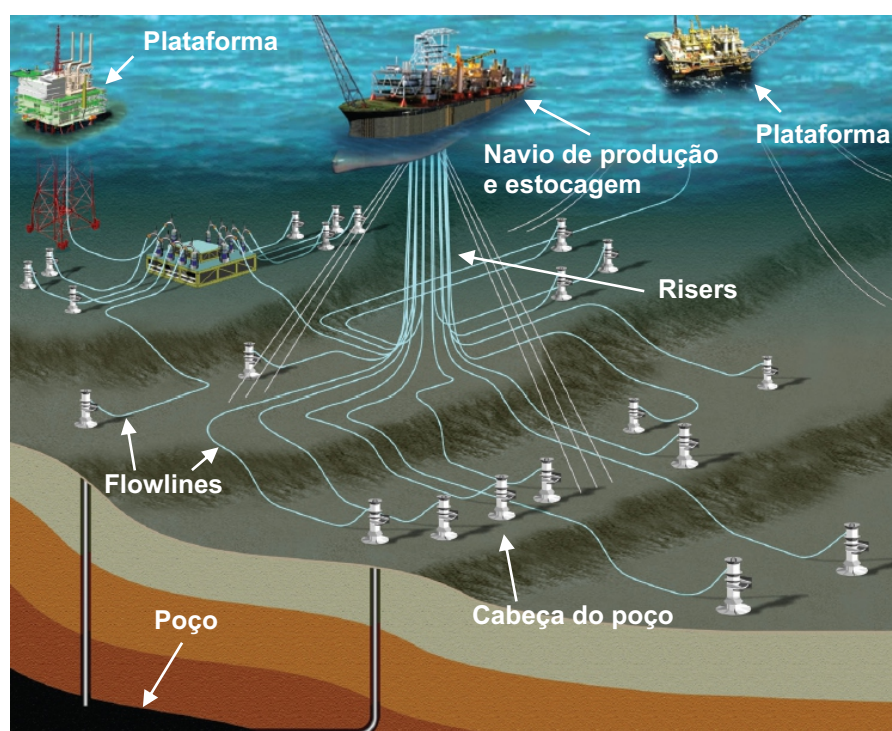
A Figura 3 exemplifica de modo simplificado a estrutura de extração de petróleo *offshore*. Após ser extraído do poço, o petróleo segue a partir da cabeça do poço por uma tubulação denominada *flowline*, sendo elevado à plataforma através de uma tubulação denominada *riser*. Na grande maioria dos sistemas *offshore*, os dutos que constituem as linhas que acompanham o leito marinho (*flowline*) e os suspensos em catenária até a plataforma (*riser*) são constituídos de tubos flexíveis. O escoamento nessas linhas de produção é multifásico, ou seja, geralmente óleo e água escoam juntamente com gás pelas tubulações flexíveis, que podem ter diferentes diâmetros, entre o poço de extração de petróleo e os separadores que estão localizados nas plataformas de produção. O padrão de escoamento³ que ocorre com maior frequência

² As principais características dos tubos flexíveis são a baixa rigidez à flexão (característica que possibilita a estocagem dos tubos flexíveis em bobinas), alta rigidez axial (o que proporciona a resistência do tubo em altas pressões) e a capacidade de suportar impactos estruturais e esforços dinâmicos extremos (MALTA, 2016).

³ Conceito de escoamento multifásico que será definido no capítulo 2.

nessas linhas de produção de petróleo e gás é o padrão em golfadas, que é caracterizado pela passagem sucessiva de bolhas alongadas de gás, que deslizam sobre um filme de líquido, seguidas por pistões de líquido que podem conter bolhas dispersas. O desenvolvimento e otimização de equipamentos das linhas de produção da indústria do petróleo necessitam do conhecimento prévio de alguns parâmetros, como por exemplo o gradiente de pressão, que precisa ser obtido de forma rápida e confiável.

Figura 3 – Representação esquemática de uma estrutura de extração de petróleo offshore.



Fonte: Adaptado de Moraes (2013).

A presença das cavidades no interior da tubulação pode proporcionar alterações na dinâmica do escoamento e essas alterações precisam ser investigadas. Djenidi *et al.* (1994) analisaram o comportamento de um escoamento monofásico turbulento de água sobre uma placa com cavidades do “tipo d”, utilizando anemometria Laser-Doppler, e constataram que as cavidades provocam expulsão do fluido que está no interior da cavidade contra o escoamento do fluido que está fora da cavidade. Esse fenômeno também foi observado por Elavarasan *et al.* (1996). Os autores identificaram que as expulsões de fluido proporcionam um aumento global da turbulência no fluido o que provoca uma troca de quantidade de movimento devido à presença da cavidade. Estudos numéricos feitos pelos autores Chang *et al.* (2006), utilizando placas com cavidades do “tipo d”, constataram que os efeitos da turbulência são amplificados devido à presença das cavidades. O aumento da turbulência de um fluido

proporciona um aumento das perturbações dentro do escoamento o que, por sua vez, pode provocar um aumento do coeficiente de atrito nas superfícies com cavidades quando comparado ao coeficiente de atrito das superfícies lisas (SUTARDI; CHING, 2003).

Contudo, os estudos feitos por Chen *et al.* (1986) mostraram que o escoamento externo de ar, em condições específicas estabelecidas pelo autor, sobre uma superfície corrugada com pequena largura de cavidades (w) e com um passo entre as cavidades reduzido, proporciona uma redução do atrito. Logo, os efeitos que as cavidades dos tubos corrugados provocam em um escoamento devem ser investigados levando em consideração as características e condições do escoamento em análise, pois essas características podem mudar positivamente ou negativamente o comportamento do escoamento em tubos corrugados quando comparado com tubos lisos.

O gradiente de pressão em tubulações com escoamento bifásico é requisito essencial para o desenvolvimento de diversos projetos e equipamentos nas indústrias de petróleo, química, nuclear, térmica entre outras. Devido ao fato de que cada indústria tem necessidades específicas com relação às características geométricas das tubulações, é de extrema importância conhecer as influências da largura das cavidades e do diâmetro interno dos tubos corrugados no gradiente de pressão de um escoamento bifásico. Outro grande interesse da indústria é obter o valor do gradiente de pressão de forma rápida e confiável, por isso a determinação através de uma correlação simples e precisa é imprescindível. Diversos trabalhos na literatura propuseram correlações empíricas e teóricas para o cálculo do gradiente de pressão para escoamentos em tubos lisos. No entanto, são poucos e restritos os trabalhos que estudam o gradiente de pressão bifásico em tubos corrugados.

1.1 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é analisar experimentalmente a influência da largura das cavidades (w) do “tipo d” de tubos corrugados de diferentes diâmetros (D) no gradiente de pressão de um escoamento horizontal bifásico ar-água no padrão golfadas, com condições de temperatura e pressão na saída ambiente. A partir da regressão dos dados experimentais, uma nova correlação para o fator multiplicador de Lockhart e Martinelli do gradiente de pressão de um escoamento bifásico é proposta, levando em consideração a largura da cavidade e o diâmetro interno da tubulação corrugada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados conceitos de escoamento multifásico, gradiente de pressão de um escoamento bifásico e uma revisão de estudos disponíveis na literatura. Inicialmente, é feita uma descrição dos padrões de escoamentos bifásicos existentes em tubulações horizontais. Na sequência, são apresentados os dois principais modelos para predição do gradiente de pressão em um escoamento bifásico horizontal em tubulações lisas. Por fim, é apresentada uma revisão de trabalhos que investigaram e propuseram correlações para o gradiente de pressão bifásico em tubulações lisas e rugosas e alguns estudos realizados com tubulação corrugada.

2.1 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

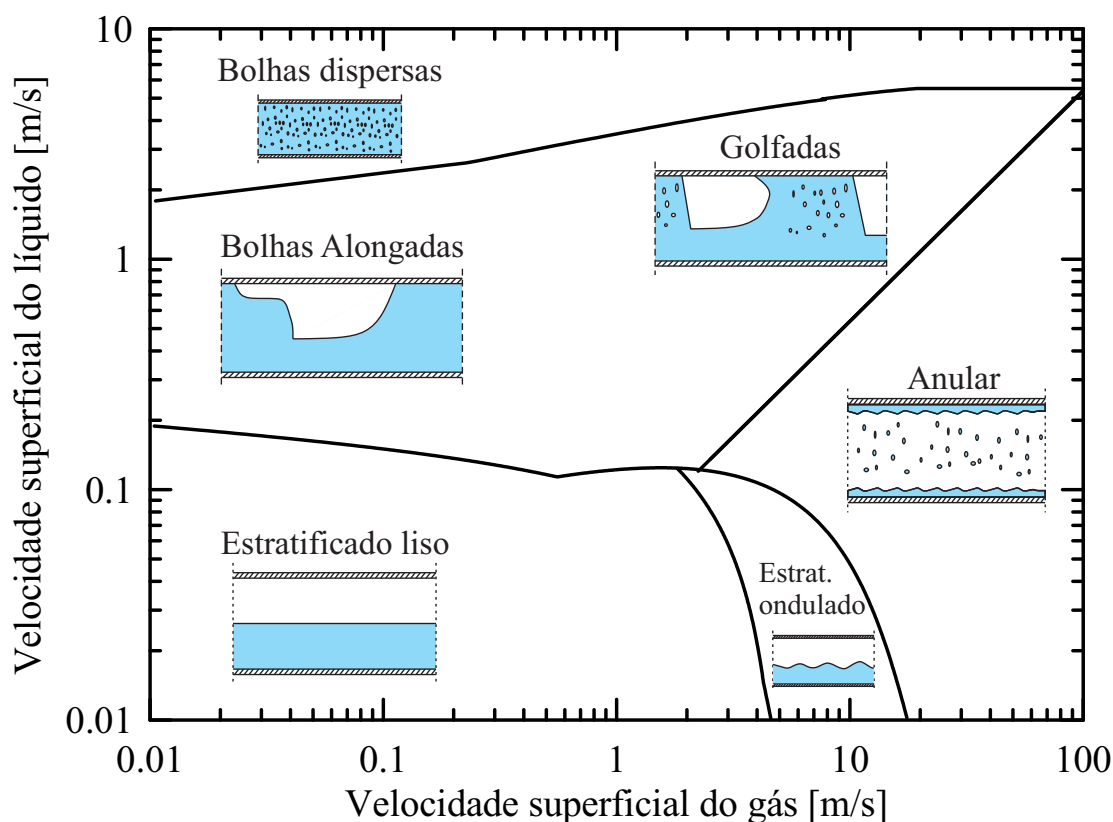
Um escoamento multifásico é caracterizado pelo escoamento simultâneo de várias fases, as quais podem ser sólidas, líquidas ou gasosas. Quando duas ou mais fases escoam juntas em uma tubulação são observadas diferentes distribuições geométricas entre essas fases, comportamento conhecido como padrão de escoamento. O padrão de escoamento depende de algumas variáveis, como por exemplo, os parâmetros operacionais de cada fase (vazão mássica), variáveis geométricas da tubulação (inclinação e diâmetro) e das propriedades físicas de cada fase (massa específica, viscosidade e tensões superficiais). No caso particular do escoamento bifásico gás-líquido em tubulações horizontais as fases podem se distribuir nos padrões de escoamento: estratificado liso, estratificado ondulado, bolhas alongadas, golfadas, bolhas dispersas e anular (SHOHAM, 2006).

A Figura 4 apresenta os padrões de escoamento para um escoamento bifásico ar-água horizontal em função da velocidade superficial do líquido (J_L) e da velocidade superficial do gás (J_G). A velocidade superficial da fase, é definida como a velocidade que a fase possui ao escoar sozinha por toda a área da seção transversal da tubulação na seção de teste (de interesse), Equação 2.1.

$$J_\psi = \frac{q_\psi}{A} \quad (2.1)$$

onde ψ pode ser substituído por L ou G para representar as fases líquida e gasosa, respectivamente, q_ψ é a vazão volumétrica da fase e A é a área total da seção transversal da tubulação.

Figura 4 – Mapa de padrões de escoamento bifásico ar-água horizontal, para tubulação com 26 mm de diâmetro interno, obtido a partir do modelo proposto por Taitel e Dukler (1976).



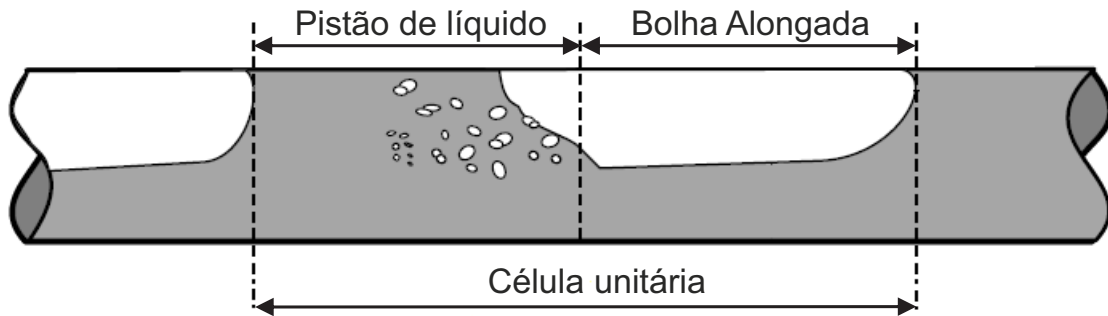
O padrão de escoamento estratificado ocorre para baixas velocidades superficiais das fases líquida e gasosa, onde por efeito da gravidade a fase líquida escoar na região inferior e a fase gasosa na região superior da tubulação. A transição entre os padrões estratificado liso, que possui uma interface entre as fases suave e uniforme, e o padrão estratificado ondulado acontece com o aumento da velocidade superficial da fase gasosa.

Os padrões de escoamento em bolhas alongadas e golfadas são caracterizados pela intermitência do escoamento das fases líquida e gasosa, onde uma bolha alongada de gás, que desliza sobre um filme de líquido, é seguida por um pistão de líquido. As estruturas geométricas, bolha alongada de gás e o pistão de líquido, caracterizam a definição de célula unitária do padrão de escoamento em bolhas alongadas e golfadas, como representado esquematicamente pela Figura 5. A principal diferença entre esses padrões de escoamento é a presença de bolhas dispersas de gás no pistão de líquido no padrão em golfadas, que ocorrem devido ao aumento da velocidade superficial da fase gasosa.

O escoamento no padrão bolhas dispersas, o qual tem a fase líquida como fase contínua, ocorre para altas velocidades superficiais de líquido. As

bolhas dispersas de gás são pequenas, quando comparadas ao diâmetro da tubulação, e escoam predominantemente pela região superior da tubulação.

Figura 5 – Representação esquemática da célula unitária de um escoamento líquido-gás em golfadas.



O padrão anular acontece quando o escoamento apresenta altas velocidades superficiais de gás e baixas velocidades superficiais de líquido. O gás escoam pela região central da tubulação, a qual pode conter gotas de líquido, enquanto o líquido escoam em forma de filme junto às paredes da tubulação.

2.2 GRADIENTE DE PRESSÃO EM UM ESCOAMENTO BIFÁSICO

2.2.1 Modelo Homogêneo

O modelo homogêneo assume que o escoamento bifásico é uma mistura, onde essa mistura é tratada como uma pseudo-fase, com velocidade média e propriedades médias dos fluidos. As propriedades da mistura bifásica são determinadas a partir das propriedades de cada fase (fase líquida e fase gasosa) e ponderadas pelo *holdup* de líquido de não escorregamento (λ_L). O λ_L representa a fração volumétrica de líquido presente na tubulação, Equação 2.2, (SHOHAM, 2006).

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_G} = \frac{J_L}{J_L + J_G} \quad (2.2)$$

onde q_ψ é a vazão volumétrica da fase e J_ψ é a velocidade superficial da fase.

O modelo homogêneo possui algumas considerações que estão enumeradas abaixo:

1. Escoamento unidimensional e em regime estacionário.
2. As duas fases estão bem misturadas e encontram-se em equilíbrio.
3. Não ocorre escorregamento entre as fases.

4. A área da seção transversal da tubulação (A) pode variar ao longo da direção axial.
5. Transferência de massa ocorre entre as fases, e o título (x) varia ao longo da direção axial.
6. Ambas as fases são compressíveis.

O título (x) é definido como a razão entre a vazão mássica da fase gasosa ($\dot{m}_G$) e a vazão mássica total do escoamento bifásico ($\dot{m}_L + \dot{m}_G$), Equação 2.3.

$$x = \frac{\dot{m}_G}{\dot{m}_G + \dot{m}_L} \quad (2.3)$$

onde $\dot{m}_\psi$ é a vazão mássica da fase.

O gradiente de pressão em um escoamento bifásico ($dP/dL|_{LG}$) para o modelo homogêneo pode ser obtido a partir da Equação 2.4.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{LG} = \frac{f_M \rho_{NS} J_m^2}{2D} \quad (2.4)$$

onde f_M é o fator de atrito de Moody, ρ_{NS} é massa específica de não deslizamento da mistura bifásica, J_m é a velocidade média da mistura bifásica e D é o diâmetro interno da tubulação.

Os parâmetros ρ_{NS} e J_m podem ser calculados a partir das Equações 2.5 e 2.6, respectivamente.

$$\rho_{NS} = \rho_L \lambda_L + \rho_G(1 - \lambda_L) \quad (2.5)$$

onde λ_L é a fração de líquido de não deslizamento, ρ_ψ é a massa específica da fase.

$$J_m = \frac{q_L + q_G}{A} = J_L + J_G \quad (2.6)$$

onde q_ψ é a vazão volumétrica da fase, A é área da seção transversal da tubulação e J_ψ é a velocidade superficial da fase.

2.2.2 Modelo de Lockhart-Martinelli

O modelo proposto por Lockhart e Martinelli (1949) calcula o gradiente de pressão, para um escoamento bifásico horizontal em tubulação lisa, assumindo que cada fase escoar separadamente na tubulação. Este modelo utiliza o conceito de diâmetro hidráulico das fases (d_ψ) e possui duas considerações, as quais são utilizadas para garantir o acoplamento entre as fases (SHOHAM, 2006). A primeira consideração do modelo, relacionada com as

áreas que cada fase ocupa na tubulação e a área total da tubulação, define que a soma da área da fase líquida (A_L) com a área da fase gasosa (A_G) é igual a área total da tubulação (A), como apresentado na Equação 2.7.

$$A_L + A_G = A \quad (2.7)$$

A segunda consideração estabelece, que para um escoamento bifásico em regime permanente, o gradiente de pressão da fase líquida ($dP/dL|_L$) é igual ao gradiente de pressão da fase gasosa ($dP/dL|_G$), que por consequência, também é igual ao gradiente de pressão do escoamento bifásico líquido-gás ($dP/dL|_{LG}$), Equação 2.8.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_L = \left. \frac{dP}{dL} \right|_G = \left. \frac{dP}{dL} \right|_{LG} \quad (2.8)$$

Os gradientes de pressão das fases líquida e gasosa são obtidos a partir das Equações 2.9 e 2.10, respectivamente.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_L = \frac{2}{d_L} f_L \rho_L v_L^2 \quad (2.9)$$

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_G = \frac{2}{d_G} f_G \rho_G v_G^2 \quad (2.10)$$

onde f_ψ é o fator de atrito da fase, e v_ψ é a velocidade local da fase¹ e d_ψ é o diâmetro hidráulico que a fase ocupa na tubulação em um escoamento bifásico.

O fator de atrito da fase (f_ψ) é calculado a partir da Equação de Blasius, Equação 2.11.

$$f_\psi = a Re_\psi^{-b} \quad (2.11)$$

onde Re_ψ é o número de Reynolds da fase, calculado a partir da Equação 2.12, a e b são constantes definidas a partir do regime do escoamento (laminar ou turbulento). Para escoamento em regime laminar $a = 64$ e $b = 1$ e para regime turbulento $a = 0,316$ e $b = 0,25$.

$$Re_\psi = \frac{\rho_\psi J_\psi D}{\mu_\psi} \quad (2.12)$$

onde μ_ψ é a viscosidade dinâmica da fase.

Lockhart e Martinelli (1949) propuseram que o gradiente de pressão para um escoamento bifásico ($dP/dL|_{LG}$) poderia ser determinado a partir da multiplicação de um fator adimensional o qual está relacionado com uma das fases do escoamento bifásico, conhecido na literatura como fator multiplicador

¹ A velocidade local da fase é definida como a razão entre a vazão volumétrica da fase sobre a área que a fase ocupa na seção transversal da tubulação ($v_\psi = q_\psi / A_\psi$).

de Lockhart-Martinelli, com o gradiente de pressão considerando que a fase escoar sozinha por toda a seção transversal da tubulação ($dP/dL|_{S\psi}$), Equação 2.13 ou Equação 2.13.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{LG} = \phi^2|_L \left. \frac{dP}{dL} \right|_{SL} \quad (2.13)$$

onde $\phi^2|_L$ é o fator multiplicador da fase líquida.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{LG} = \phi^2|_G \left. \frac{dP}{dL} \right|_{SG} \quad (2.14)$$

onde $\phi^2|_G$ é o fator multiplicador da fase gasosa.

O gradiente de pressão assumindo que a fase (ψ) escoar sozinha por toda a seção transversal da tubulação ($dP/dL|_{S\psi}$) é calculado a partir da Equação 2.15.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{S\psi} = \frac{f_\psi \rho_\psi J_\psi^2}{2D} \quad (2.15)$$

onde D é o diâmetro total da tubulação e (ψ) pode ser substituído por L e G para representar a fase líquida e gasosa, respectivamente.

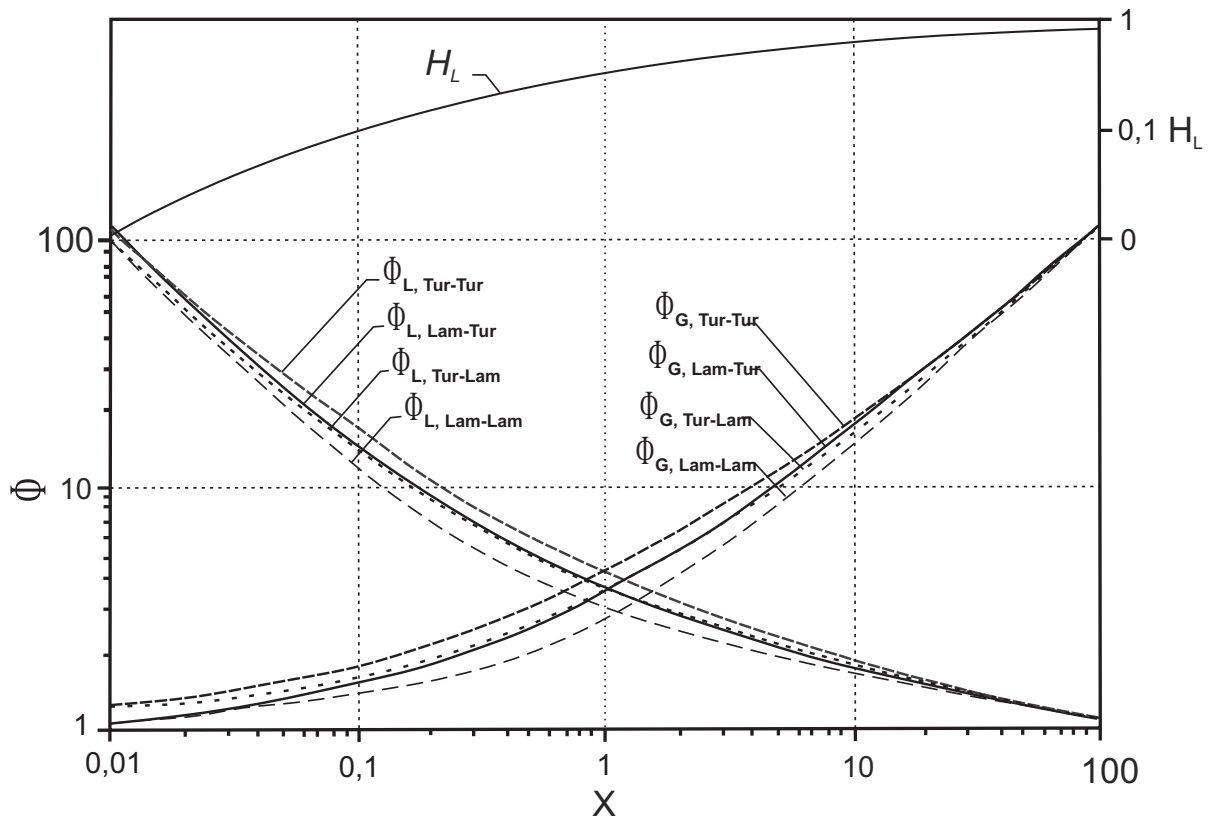
Dividindo a Equação 2.13 pela Equação 2.14, obtêm-se a definição do parâmetro de Lockhart-Martinelli (X), Equação 2.16.

$$\frac{\phi|_G}{\phi|_L} = \sqrt{\frac{\left. \frac{dP}{dL} \right|_{SL}}{\left. \frac{dP}{dL} \right|_{SG}}} = \sqrt{\frac{f_L \rho_L J_L}{f_G \rho_G J_G}} = X \quad (2.16)$$

Devido à sua definição, razão entre os fatores multiplicadores da fase gasosa pela fase líquida, o parâmetro X é apenas dependente das propriedades físicas e velocidades superficiais das fases (J_L , J_G). Lockhart e Martinelli (1949) propuseram, a partir de testes experimentais, que o fator multiplicador da fase líquida, ou da fase gasosa, e o *holdup* de líquido são determinados a partir do regime de escoamento de cada fase, laminar ou turbulento, e podem ser determinados a partir da Figura 6.

A partir da Equação 2.13, ou Equação 2.14, e utilizando o fator multiplicador obtido a partir da Figura 6, é possível calcular o gradiente de pressão de um escoamento bifásico.

Figura 6 – Fator multiplicador em função do parâmetro X.



Fonte: Adaptado de Lockhart e Martinelli (1949).

2.2.3 Estudos Sobre o Escoamento em Tubos Lisos

Alguns estudos que propuseram correlações relacionadas com os modelos homogêneo e de Lockhart-Martinelli e trabalhos disponíveis na literatura aberta que avaliaram o desempenho dessas correlações são apresentados nesta seção.

Chisholm (1967) estabeleceu correlações para o cálculo dos fatores multiplicadores de Lockhart-Martinelli ($\phi^2|_L$ e $\phi^2|_G$), Equações 2.17 e 2.18 para as fases líquida e gasosa, respectivamente, em relação a natureza laminar ou turbulenta do escoamento da fase.

$$\phi^2|_L = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (2.17)$$

$$\phi^2|_G = 1 + CX + X^2 \quad (2.18)$$

onde C é um coeficiente que pode ser determinado a partir da Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficiente de Chisholm (1967) - C.

Fase Líquida	Fase Gás	Coeficiente (C)
Turbulento	Turbulento	20
Laminar	Turbulento	12
Turbulento	Laminar	10
Laminar	Laminar	5

Vaze e Banerjee (2013) propuseram uma correlação para o coeficiente C do fator multiplicador proposto por Chisholm (1967) que considera a influência que uma fase possui em relação a outra. A Equação 2.19 apresenta a correlação que estabelece um valor para C em relação ao número de Reynolds de cada fase do escoamento bifásico.

$$C = C_1 Re_{SL}^p Re_{SG}^q \quad (2.19)$$

onde C_1 , p , q são constantes que devem ser determinadas por regressão dos dados experimentais e Re_{ψ} é o número de Reynolds da fase.

Alguns estudos presentes na literatura como Lee e Lee (2001), Mishima e Hibiki (1996), Lee e Mudawar (2005) e Sun e Mishima (2009) propuseram correlações para o coeficiente C que são específicas para micro e mini tubulações².

Friedel (1979) propôs uma correlação para o $\phi^2|_{SL}$ que inclui os efeitos da gravidade e tensão superficial do escoamento, Equação 2.20.

$$\phi^2|_{SL} = E + \frac{3,24 F H}{Fr^{0,045} We^{0,035}} \quad (2.20)$$

onde Fr é o número de Froude, Equação 2.21, We é o número de Weber, Equação 2.22, e os parâmetros E , F e H são obtidos a partir das Equações 2.23, 2.24 e 2.25, respectivamente.

$$Fr = \frac{G_m^2}{g D \rho_m^2} \quad (2.21)$$

onde G_m é o fluxo mássico da mistura bifásica líquido-gás, g é a gravidade, ρ_m é a massa específica da mistura bifásica líquido-gás e D é o diâmetro interno da tubulação.

$$We = \frac{G_m^2 D}{\rho_m \sigma_m^2} \quad (2.22)$$

² Uma classificação proposta por Kandlikar e Grande (2003) defini valores de diâmetro hidráulico $D_h > 3 \text{ mm}$, $3 \text{ mm} \geq D_h > 200 \text{ }\mu\text{m}$ e $200 \text{ }\mu\text{m} \geq D_h > 10 \text{ }\mu\text{m}$ para as respectivas tubulações convencionais, mini e micro.

onde σ_m é a tensão superficial da mistura bifásica líquido-gás.

$$E = (1 - x^2) + x^2 \frac{\rho_L f_{SG}}{\rho_G f_{SL}} \quad (2.23)$$

onde x é o título, ρ_L , ρ_G , f_{SL} e f_{SG} são as massas específica e os coeficientes de atrito monofásico das fases líquida e gasosa, respectivamente.

$$F = x^{0,78} (x - 1)^{0,224} \quad (2.24)$$

onde x é o título.

$$H = \left(\frac{\rho_L}{\rho_G} \right)^{0,91} \left(\frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0,19} \left(1 - \frac{\mu_G}{\mu_L} \right)^{0,7} \quad (2.25)$$

onde μ_L e μ_G são as viscosidades dinâmica da fase líquida e gasosa respectivamente.

Sun e Mishima (2009) analisaram 2092 dados experimentais adquiridos a partir de 18 estudos sobre o escoamento bifásico disponíveis na literatura. Os dados analisados são para fluidos refrigerantes (R123, R134a, R22, R236ea, R254fa, R404a, R407C, R410a, R507), CO_2 , água e ar em dutos com diâmetro hidráulico variando entre 0,506 e 12 mm. Os autores avaliaram as correlações existentes na literatura para a predição do gradiente de pressão de um escoamento bifásico e concluíram que a correlação proposta por Friedel (1979) não é adequada para a predição do gradiente de pressão em um escoamento bifásico ar-água.

Muller-Steinhagen e Heck (1986) propuseram uma correlação para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em função do título e assumindo que as fases líquida e gasosa escoam sozinhas mas com o fluxo mássico da mistura (G_m), Equação 2.26.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{LG} = G_{MH} (1 - x)^{1/3} + x^3 \left. \frac{dP}{dL} \right|_{go} \quad (2.26)$$

onde G_{MH} é um fator proposto por Muller-Steinhagen e Heck (1986) definido pela Equação 2.27, os subíndice lo e go representam o gradiente de pressão da fase líquida e gasosa, respectivamente, quando as mesmas escoam sozinhas na tubulação com o fluxo mássico da mistura (G_m).

$$G_{MH} = \left. \frac{dP}{dL} \right|_{lo} + 2x \left(\left. \frac{dP}{dL} \right|_{go} - \left. \frac{dP}{dL} \right|_{lo} \right) \quad (2.27)$$

onde x é o título e $dP/dL|_{\psi_o}$ é o gradiente de pressão da fase escoando sozinha na tubulação com o fluxo mássico da mistura Equação 2.28.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\psi_o} = f_{\psi_o} \frac{G_m^2}{2 \rho_{\psi} D} \quad (2.28)$$

onde f_{ψ_o} é o fator de atrito da fase calculado a partir da Equação 2.11 utilizando o número de Reynolds da fase calculado a partir do fluxo da mistura, Equação 2.29.

$$Re_{\psi} = \frac{G_m D}{\mu_{\psi}} \quad (2.29)$$

Xu *et al.* (2012) avaliaram 29 correlações de predição do gradiente de pressão de um escoamento bifásico utilizando 3480 dados experimentais para tubulação lisa com diâmetro interno variando entre 0,0695 e 14 mm. Os autores apresentaram comparações entre as correlações propostas e os dados experimentais para analisar os efeitos do diâmetro interno da tubulação, vazão mássica e padrões de escoamento. Segundo os autores, a correlação proposta por Muller-Steinhagen e Heck (1986) apresenta um bom desempenho em relação aos dados experimentais analisados.

Shannak (2008) propôs uma correlação para predição do gradiente de pressão de um escoamento bifásico, Equação 2.30, que consiste em novas definições para o número de Reynolds ($Re_{(LG)}$), Equação 2.31, e fator de atrito ($f_{(LG)}$), Equação 2.32.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{(LG)} = \frac{f_{(LG)} G_{(LG)}^2}{2 \rho_{(LG)} D} \quad (2.30)$$

onde $G_{(LG)}$ é o fluxo mássico bifásico.

$$Re_{(LG)} = \frac{x^2 + (1 - x^2)(\rho_G/\rho_L)}{(x^2/Re_G) + ((1 - x^2)/Re_L)(\rho_G/\rho_L)} \quad (2.31)$$

onde Re_L e Re_G são os números de Reynolds da fase líquida e fase gasosa, respectivamente.

$$\frac{1}{\sqrt{f_{(LG)}}} = -2 \log \left[\frac{1}{3,7065} \frac{\epsilon}{D} - \frac{5,0452}{Re_{(LG)}} \log \left(\frac{1}{2,8257} \left(\frac{\epsilon}{D} \right)^{1,1098} + \frac{5,8506}{(Re_{(LG)})^{0,8981}} \right) \right] \quad (2.32)$$

onde ϵ/D é a rugosidade relativa da tubulação.

O autor analisou experimentalmente a influência da rugosidade relativa da tubulação no gradiente de pressão de um escoamento bifásico ar-água em tubulações horizontais e verticais com diâmetro interno de 52,5 mm. Os resultados experimentais demonstraram que o gradiente de pressão aumenta com o aumento da rugosidade relativa da tubulação e esse aumento é mais expressivo para valores maiores de título e fluxo mássico bifásico.

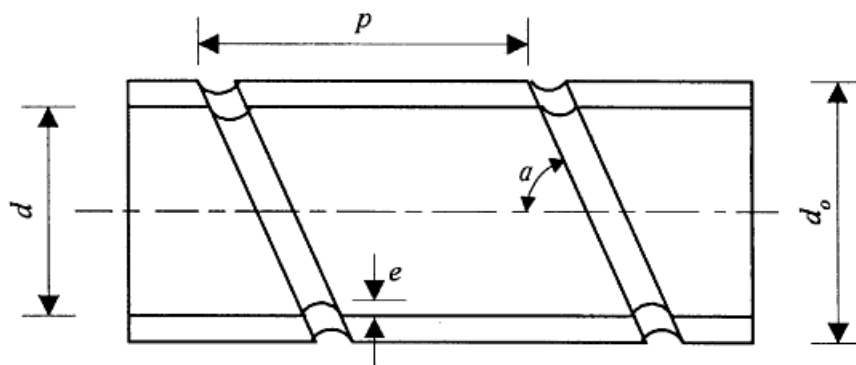
Quan *et al.* (2008) analisaram experimentalmente o gradiente de pressão de um escoamento horizontal bifásico vapor condensado-água em canais com diferentes diâmetros hidráulico (109, 142, 151 e 259 μm) e observaram

que o gradiente de pressão de um condensado é afetado pelo fluxo mássico, título e pelo diâmetro hidráulico. Os autores propuseram uma correlação para o coeficiente C que considera os efeitos da tensão superficial entre as fases e o diâmetro hidráulico dos canais. Os trabalhos realizados pelos autores Hamad *et al.* (2017), Lu *et al.* (2018) e Kong *et al.* (2018) também avaliaram o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em diferentes diâmetros interno de tubulação lisa.

2.2.4 Estudos Sobre o Escoamento em Tubos Corrugados

Dong *et al.* (2001) avaliaram a transferência de calor e o fator de atrito de um escoamento turbulento, a partir de testes monofásicos utilizando os fluidos água e óleo, em tubos corrugados, Figura 7. Os autores concluíram que os tubos corrugados apresentam um desempenho térmico melhor e um fator de atrito maior quando comparados com os resultados obtidos para tubulação lisa.

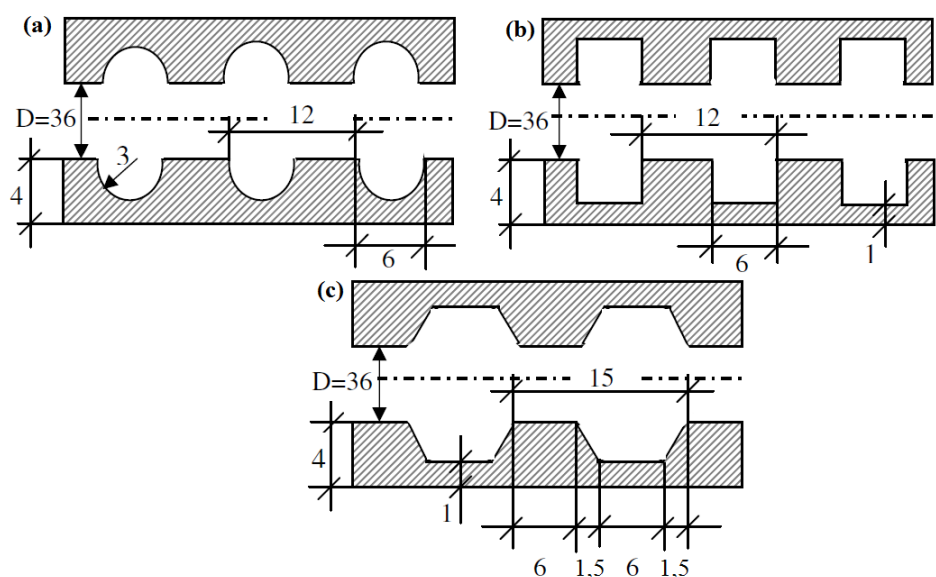
Figura 7 – Representação geométrica dos tubos corrugados.



Fonte: Adaptado de Dong *et al.* (2001).

Bilen *et al.* (2009) realizaram um estudo experimental para investigar a transferência de calor de um escoamento monofásico turbulento de ar em tubos corrugados com diferentes formatos de cavidades (circular, trapezoidal e retangular), Figura 8. Os autores compararam o desempenho de transferência de calor entre as diferentes cavidades de tubulação corrugada e observaram que a geometria circular da cavidade proporcionou um melhor desempenho quando comparado com os outros formatos de cavidade e com a tubulação lisa.

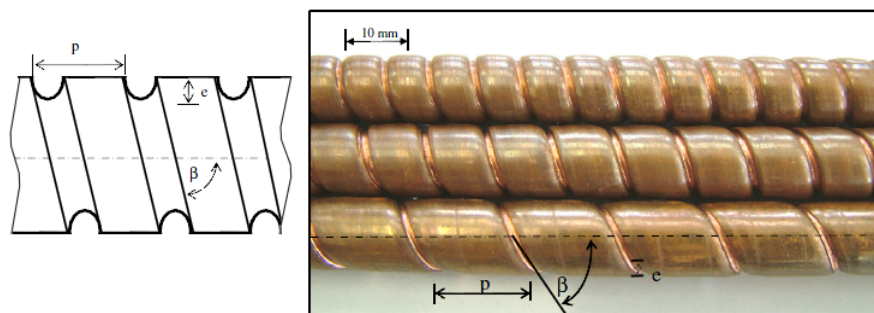
Figura 8 – Representação das geometrias, com dimensões em mm, dos tubos corrugados com diferentes tipos de geometria de cavidade. (a) Circular, (b) Retangular e (c) Trapezoidal.



Fonte: Adaptado de Bilen *et al.* (2009).

Laohalertdecha e Wongwises (2011) avaliaram experimentalmente a transferência de calor e fator de atrito de um escoamento de R-134a em tubulações corrugadas com diâmetro interno de 8,7 mm com diferentes passos de cavidade ($p=5,08$, $6,35$ e $8,46$ mm) e altura de cavidade ($e=1$, $1,25$ e $1,5$ mm). Uma representação da tubulação corrugada utilizada pelos autores é apresentada na Figura 9. Os autores observaram que o número de Nusselt é maior na tubulação corrugada, quando comparado aos resultados para a tubulação lisa, e tende a aumentar com o aumento da altura da cavidade e com o decréscimo do passo das cavidades. Segundo os autores, para o fator de atrito, a influência do passo e da altura das cavidades foram insignificantes. Laohalertdecha e Wongwises (2011) propuseram correlações para predição do número de Nusselt e fator de atrito em tubulação corrugada.

Estudos realizados por HarleB *et al.* (2016), Li e Jin (2019) e Sun e Zeng (2018) também analisaram a transferência de calor e fator de atrito em tubos corrugados. Dalkiliç *et al.* (2017) avaliaram e fizeram algumas considerações sobre desempenho de 38 correlações para predição do gradiente de pressão durante a condensação de R134-a em tubos lisos e tubos corrugados com diâmetro interno de 8,1 mm.

Figura 9 – Representação esquemática dos tubos corrugados.

Fonte: Adaptado de Laohalertdecha e Wongwises (2011).

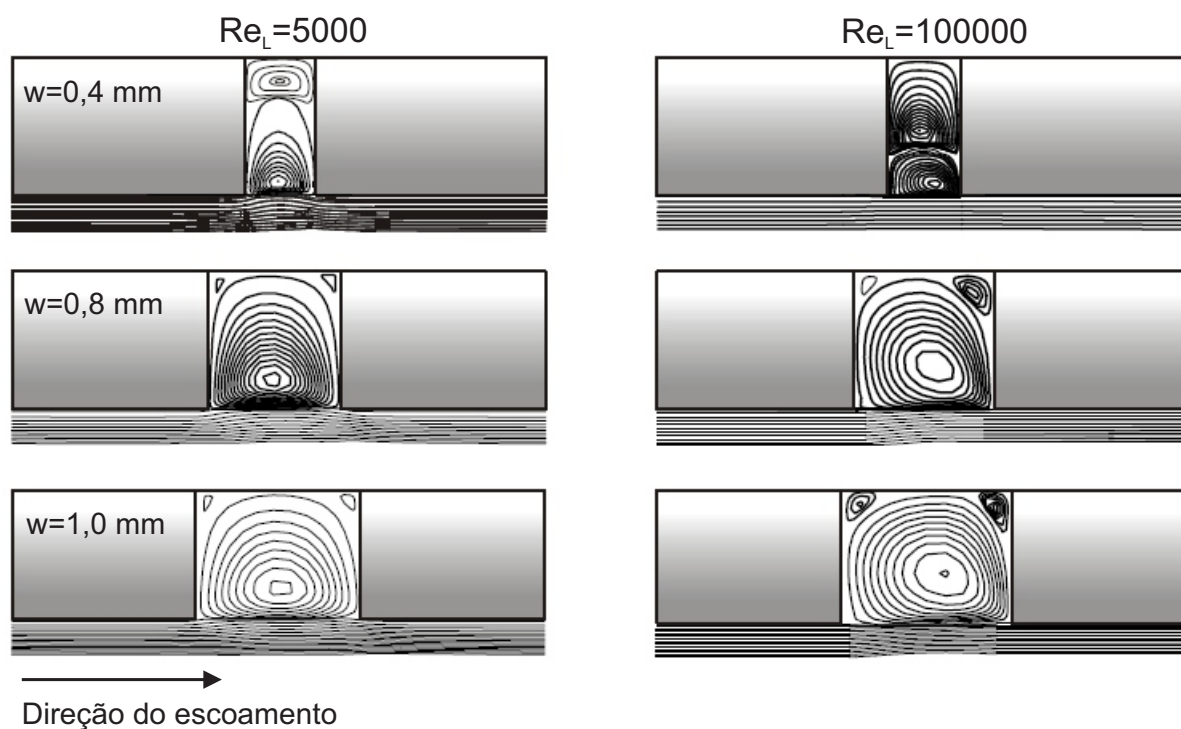
Azevedo (2010) avaliou, numericamente e experimentalmente, o comportamento do fator de atrito em tubos corrugados com diâmetro interno de 26 mm para diferentes configurações geométricas de cavidades do “tipo d” de um escoamento monofásico turbulento de água. O autor observou que o fator de atrito aumenta com o aumento da largura da cavidade (w) e que o mesmo não sofre influência significativa, variações menores do que 2%, com as mudanças da altura da cavidade (h) do tubo corrugado.

A Figura 10 apresenta os resultados numéricos obtidos por Azevedo (2010) para as linhas de corrente de um escoamento monofásico em tubulação corrugada. Analisando o comportamento das linhas de corrente dentro das cavidades, o autor observou que as maiores larguras de cavidade, $w=0,8$ mm e $w=1,0$ mm, apresentam linhas de corrente em formato de um grande vórtice, o qual possui sentido anti-horário e ocupa aproximadamente toda a região central da cavidade, e vórtices pequenos, com sentido horário, localizados nas extremidades superiores das cavidades. O comportamento das linhas de corrente para a menor largura de cavidade, $w=0,4$ mm, se mostrou um pouco diferente em comparação com as maiores larguras, com a presença de dois vórtices que possuem tamanhos semelhantes. Com relação ao escoamento principal, o autor observou que o mesmo comprime o fluido que está confinado na cavidade, fenômeno observado pela pequena curvatura das linhas de corrente do escoamento principal, e que essa compressão faz o escoamento principal ir de encontro com a quina à jusante da cavidade o que proporciona altos valores de pressão de estagnação nessa região na cavidade.

A Figura 11 apresenta o resultado numérico obtido por Azevedo (2010) para a distribuição do coeficiente de pressão (C_p)³ de um escoamento monofásico com número de Reynolds de 100000.

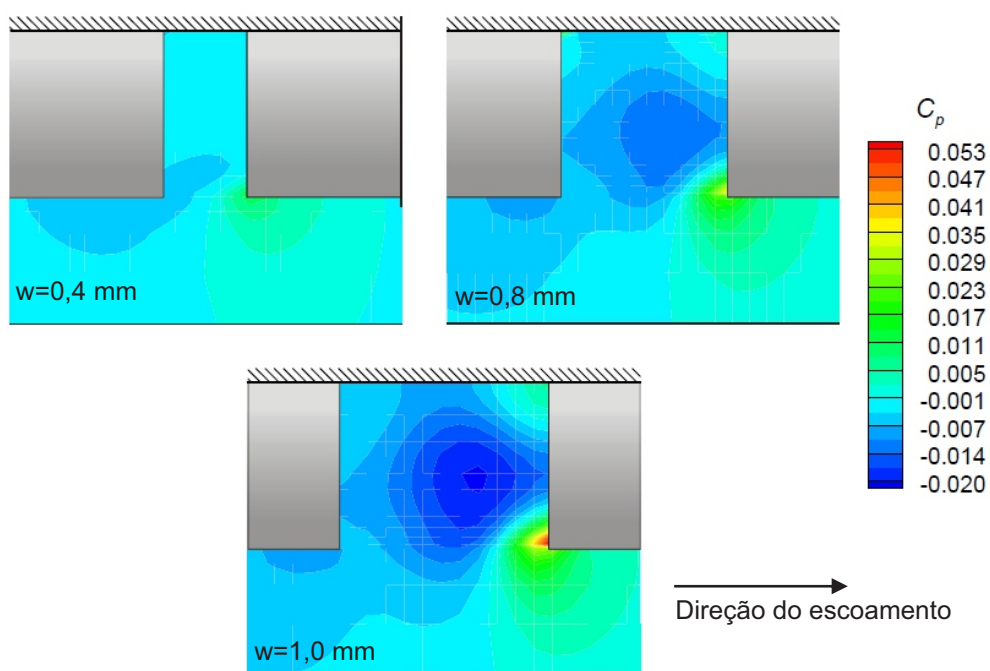
³ Definido como $C_p = (\bar{p} - \bar{p}_{ref}) / (0,5 \rho \bar{V}^2)$ onde $\bar{p}_{ref}$ é a pressão de referência adotada como o valor calculado na entrada do domínio numérico.

Figura 10 – Comportamento das linhas de corrente para um escoamento monofásico, a partir de simulação numérica, em tubos corrugados com diferentes larguras de cavidade.



Fonte: Adaptado de Azevedo (2010).

Figura 11 – Distribuição do coeficiente de pressão em diferentes larguras de cavidade.

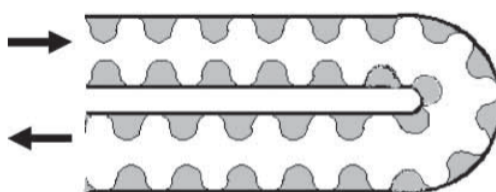


Fonte: Adaptado de Azevedo (2010).

O autor observou baixos valores de pressão no centro da cavidade, com valores negativos que representam as regiões em que ocorrem a recirculação do fluido, e altos valores de pressão na quina à jusante da cavidade que representam a pressão de estagnação do fluido devido ao impacto do mesmo nessa região.

Shannak *et al.* (2010) realizaram testes experimentais para um escoamento bifásico ar-água em tubos corrugados em forma de U, Figura 12, com diferentes razões de curvatura (raio/diâmetro variando entre $R/D=3 - 7,5$) e diâmetro interno de 40 mm. Os autores investigaram as influências que o fluxo mássico ($300 - 800 \text{ kg}/\text{m}^2\text{s}$), título ($0,01 - 0,6$), pressurização do sistema experimental ($3 - 7 \text{ bar}$) e razão de curvatura exercem sobre o gradiente de pressão bifásico. Shannak *et al.* (2010) concluíram que o gradiente de pressão é maior para tubos corrugados em U quando comparado com tubos lisos em U e tende a aumentar com o aumento do fluxo mássico e título. Com relação a pressão do sistema e a razão de curvatura dos tubos, os autores observaram que a diminuição dessas variáveis proporciona um aumento do gradiente de pressão bifásico. Um modelo para o cálculo do gradiente de pressão para tubulação corrugada em U, que considera a razão de curvatura da tubulação corrugada, foi proposto pelos autores e proporciona um desvio percentual menor que 7% entre predição e dados experimentais.

Figura 12 – Representação esquemática do tubo corrugado em U.



Fonte: Adaptado de Shannak *et al.* (2010).

Naidek *et al.* (2017) propuseram uma correlação empírica para o fator multiplicador de Lockhart-Martinelli ($\phi^2|_L$) que considera os efeitos de cavidades do “tipo d” de tubos corrugados com diâmetro interno de 26 mm. Os autores realizaram testes experimentais para um escoamento bifásico ar-água horizontal no padrão golfadas em tubos corrugados com quatro diferentes configurações geométricas de cavidade (G1, G2, G3 e G4), as quais possuem variações para a largura da cavidade ($w=0,4, 0,8$ e $1,0 \text{ mm}$), altura da cavidade ($h=0,8$ e $1,0 \text{ mm}$) e passo entre as cavidades ($p=3,25, 3,64$ e $3,9 \text{ mm}$), como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões das características geométricas das cavidades dos tubos corrugados.

Geometria	w [mm]	d/D [-]	w/D [-]	h [mm]	h/D [-]	p/D [-]
G1	0,4	0,110	0,015	0,8	0,030	0,125
G2	0,8	0,110	0,030	0,8	0,030	0,140
G3	1,0	0,110	0,040	0,8	0,030	0,150
G4	1,0	0,110	0,040	1,0	0,040	0,150

A correlação proposta por Naidek *et al.* (2017) para o fator multiplicador de Lockhart-Martinelli possui dois termos, Equação 2.33. O primeiro termo representa o fator multiplicador devido ao efeito da inserção das cavidades do tubo corrugado, o qual foi obtido a partir da regressão dos dados experimentais, e o segundo termo caracteriza os efeitos do padrão de escoamento utilizando a correlação para o coeficiente C proposta por Vaze e Banerjee (2013).

$$\phi^2|_L = \underbrace{\max \left[0,18 \ln \left(\frac{w}{D} \right) + 1,88 ; 1 \right]}_{\text{Primeiro termo}} \underbrace{\left[1 + \frac{1,6 Re_L^{0,31} Re_G^{-0,07}}{X} + \frac{1}{X^2} \right]}_{\text{Segundo termo}} \quad (2.33)$$

onde w é a largura da cavidade do tubo corrugado, D é o diâmetro interno do tubo corrugado, $\max[]$ representa o valor máximo entre o valor calculado e 1 e X é o parâmetro de Lockhart-Martinelli.

Naidek *et al.* (2017) obtiveram um desvio experimental de $\pm 7\%$ entre predição e os dados experimentais, concordância de predição válida se algumas recomendações forem seguidas: escoamento bifásico no padrão golfadas; diâmetro da tubulação deve ser 26 mm; razão largura da cavidade/diâmetro entre $0,015 \leq w/D \leq 0,040$; parâmetro de Lockhart-Martinelli compreendido entre $5 \leq X \leq 60$; velocidade superficial da fase líquida na faixa $0,5 \leq J_L \leq 2,5$; velocidade superficial da fase gasosa entre $0,75 \leq J_G \leq 2,5$; número de Reynolds da fase líquida contido na faixa $12000 \leq Re_L \leq 63500$ e o número de Reynolds da fase gasosa entre $1200 \leq Re_G \leq 4500$. Os autores estimam que a correlação proposta, Equação 2.33, pode ser utilizada para maiores faixas de w/D , contudo sugeriram que a veracidade do comportamento seja analisada.

2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

A revisão bibliográfica realizada neste capítulo apresentou alguns estudos disponíveis na literatura que avaliaram e propuseram correlações para

a predição do gradiente de pressão de um escoamento bifásico. Observou-se que a maioria das correlações foram propostas para prever o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação lisa, com exceções aos trabalhos de Shannak *et al.* (2010) e Naidek *et al.* (2017), os quais foram realizados para tubulações corrugadas com algumas particularidades. Shannak *et al.* (2010) investigaram tubulações corrugadas com formato em U, cujas cavidades possuem características geométricas parecidas com ondulações que estão dispostas sobre a superfície interna da tubulação. Naidek *et al.* (2017) propuseram uma correlação para o gradiente de pressão em tubulações corrugadas do tipo d, para larguras de cavidade (0,4, 0,8 e 1,0 mm) e diâmetro interno de 26 mm. Os outros estudos realizados em tubulação corrugada são, em sua maioria, para escoamento monofásico e com objetivos relacionados com a área de transferência de calor.

A principal contribuição do presente trabalho perante aos já existentes na literatura é analisar experimentalmente a influência que a largura da cavidade do “tipo d” de tubos corrugados, utilizando maiores larguras de cavidades (1,2, 1,6 e 2,0 mm) em diferentes diâmetros internos de tubulação (26, 40,8 e 50 mm), possui em relação ao gradiente de pressão de um escoamento bifásico ar-água horizontal no padrão golfadas à pressão e temperatura ambiente.

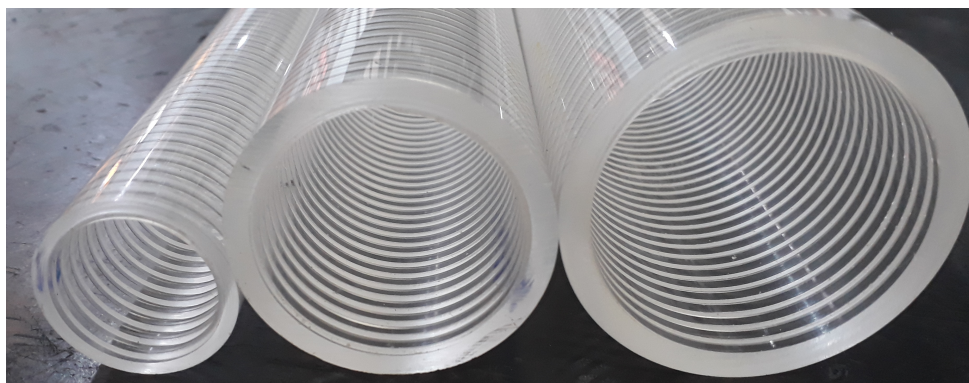
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Uma descrição dos procedimentos adotados e do circuito experimental utilizado para a execução dos testes experimentais em tubos lisos e tubos corrugados de diferentes configurações geométricas é apresentada neste capítulo. Primeiramente, é apresentada a fabricação e características geométricas das tubulações corrugadas. Na sequência, são apresentadas as principais características do circuito experimental, os detalhes sobre os parâmetros de entrada dos testes experimentais, as etapas experimentais seguidas e a validação do procedimento experimental.

3.1 FABRICAÇÃO DOS TUBOS CORRUGADOS

Neste trabalho, tubos de acrílico com diâmetros internos (D) de 26 mm (T26), 40,8 mm (T40) e 50 mm (T50) com espessuras de parede de 3, 5 e 5 mm, respectivamente, foram usinados internamente para a fabricação de tubos corrugados com diferentes larguras de cavidades (w) do “tipo d”¹ (1,2, 1,6 e 2 mm) e profundidade de cavidade (h) de 1 mm, Figura 13. Uma descrição mais detalhada do procedimento utilizado e dificuldades encontradas no processo de usinagem dos tubos corrugados é apresentada no Apêndice A.

Figura 13 – Tubos corrugados com cavidade do “tipo d” de diferentes diâmetros internos (26, 40,8 e 50 mm) fabricados com as larguras de cavidade 1,2, 1,6 e 2,0 mm.



As cavidades dos tubos corrugados são distribuídas helicoidalmente na parede interna da tubulação de acrílico, como apresentado esquematica-

¹ Stel *et al.* (2012) comprovaram numericamente que se a razão $w/h = 2$ (largura da cavidade/altura da cavidade) for atendida as cavidades possuem comportamento característico de cavidade do “tipo d” independente do passo entre as cavidades. Esta razão é atendida em todas as configurações de tubulação corrugada utilizadas neste trabalho.

mente pela Figura 14. O passo entre as cavidades possui um valor fixo ($p=3,9$ mm)² que é determinado a partir da largura da cavidade (w) mais a distância que não foi usinada entre as cavidades (d). A altura das cavidades foi mantida constante ($h=1$ mm) para as diferentes configurações de tubulação. As dimensões das características geométricas das diferentes configurações de tubulação corrugada, utilizadas no presente estudo, são apresentadas na Tabela 3.

Figura 14 – Representação esquemática de um tubo corrugado com cavidades do “tipo d” helicoidalmente distribuídas. Fonte: Do autor.

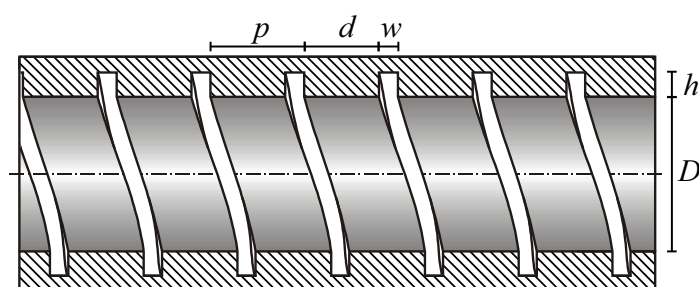


Tabela 3 – Dimensões das características geométricas das cavidades dos tubos corrugados.

D [mm]	w [mm]	d/D [-]	w/D [-]	h/D [-]	p/D [-]
26	1,2	0,104	0,046	0,038	0,150
	1,6	0,088	0,062		
	2,0	0,073	0,077		
40,8	1,2	0,066	0,029	0,025	0,096
	1,6	0,056	0,039		
	2,0	0,047	0,049		
50	1,2	0,054	0,024	0,020	0,078
	1,6	0,046	0,032		
	2,0	0,038	0,040		

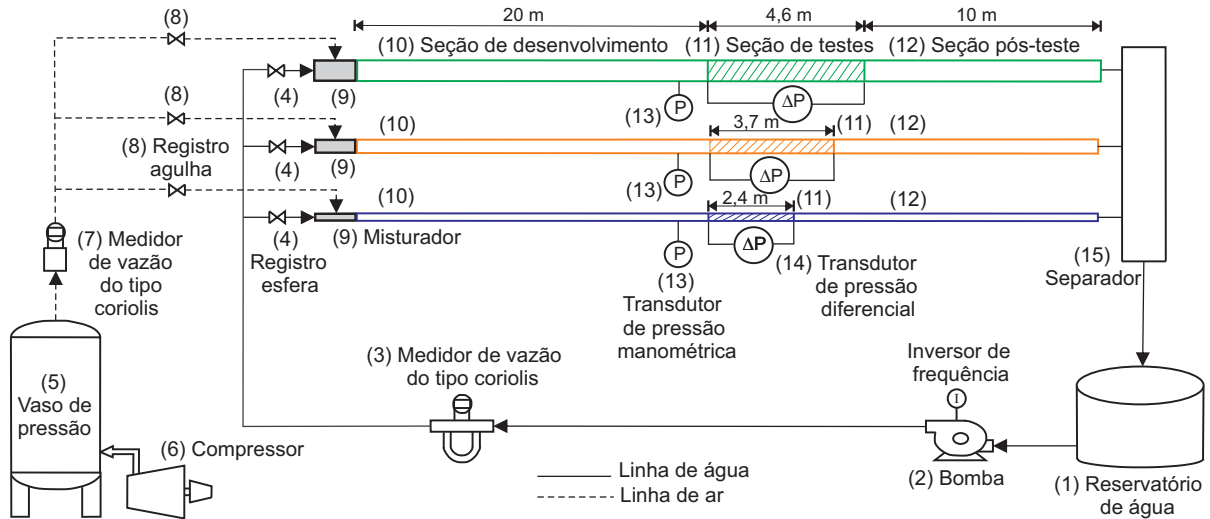
3.2 CIRCUITO EXPERIMENTAL

O circuito experimental, com pressão na saída e temperatura ambiente, utilizado para realização dos testes experimentais deste estudo foi montado nas instalações do Núcleo de Escoamento Multifásico (NUEM) na Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). O circuito, apresentado de

² Valor determinado pelo passo do fuso que foi utilizado na fabricação de todas as tubulações corrugadas deste estudo.

forma esquemática pela Figura 4, é composto por três tubulações de acrílico com diferentes diâmetros internos (26, 40,8 e 50 mm) e possui uma extensão total de aproximadamente 35 m. No presente estudo foram realizados testes monofásicos com água e testes bifásicos ar-água no padrão de escoamento em golfadas.³

Figura 15 – Representação esquemática do circuito experimental.



A água, armazenada em um reservatório aberto para atmosfera (1) com capacidade de 500 litros, é bombeada para a tubulação de acrílico por uma bomba centrífuga *Thebe*® (2) que possui uma vazão volumétrica máxima de $60 \text{ m}^3/\text{h}$. Um inversor de frequência foi utilizado para controlar a vazão da água a partir da alternância da frequência de rotação da bomba. A medição da vazão mássica ($\dot{m}_L$), temperatura (T_L) e massa específica (ρ_L) da água foram obtidas a partir de um medidor de vazão do tipo coriolis (3).⁴ A viscosidade cinemática da água (ν_L) foi obtida a partir da temperatura e calculada pela Equação 3.1, a qual reproduz os dados apresentados por Fox *et al.* (2010) e fornece um desvio percentual menor do que 0,5%, para cada teste experimental realizado.

$$\nu_L = 7,599 \times 10^{-14} T_L^4 - 1,389 \times 10^{-11} T_L^3 + 1,121 \times 10^{-9} T_L^2 - 5,481 \times 10^{-8} T_L + 1,749 \times 10^{-6} \quad (3.1)$$

³ Todos os testes bifásicos deste estudo atendem ao critério de transição entre os padrões de escoamento bolhas alongadas e golfadas, definidos por Barnea *et al.* (1980) e Ruder e Hanratty (1990), o qual define que a transição entre os padrões ocorre para a velocidade superficial do gás (J_G) igual a 0,6 m/s, independentemente da velocidade superficial da fase líquida (J_L). Neste trabalho, a velocidade superficial mínima de gás utilizada foi $J_G=0,75$ m/s.

⁴ A bancada experimental possui medidores de vazão do tipo coriolis para baixas e altas vazões.

onde T_L [°C] é a temperatura da água .

O ar é armazenado em um vaso de pressão (5) que é abastecido por um compressor *Kaeser*[®] tipo parafuso (6) de 18,5 kW com pressão máxima de 10 bar e vazão mássica de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$. A medição da vazão mássica ($\dot{m}_G$) e da temperatura do ar (T_G) também são obtidas por um medidor de vazão do tipo coriolis (7). A massa específica do ar (ρ_G) é calculada pela Equação 3.2 a partir da consideração simplificadora, adotada para este estudo, de que o ar se comporta como um gás ideal.

$$\rho_G = \frac{(P + P_{atm})}{R_{ar} (T_G + 273,15)} \quad (3.2)$$

onde P é a pressão na entrada da seção de testes, a qual é obtida a partir de um transdutor de pressão manométrica (13), P_{atm} é a pressão atmosférica obtida por um transdutor de pressão atmosférica, o qual está instalado ao lado da bancada experimental, $R_{ar}=287 \text{ J/kgK}$ é a constante específica do ar e T_G é a temperatura do ar.

A viscosidade dinâmica do ar foi calculada pela Equação 3.3 (FOX *et al.*, 2010).

$$\mu_G = \frac{(1,458 \times 10^{-6}) T_G^{3/2}}{(110,4 + T_G)} \quad (3.3)$$

onde T_G [K] é a temperatura do ar.

O escoamento bifásico ar-água é obtido com auxílio de um misturador (9) que está posicionado no início de cada tubulação de acrílico e possibilita a união das linhas de água e ar. O misturador foi construído a partir de um tubo de pvc, cujo diâmetro é equivalente ao diâmetro da tubulação de acrílico, 1/3 do diâmetro interno desse misturador é separado por uma peça de pvc colada na região superior para estabelecer a região de entrada do ar, o qual entra por um furo de 4 mm de diâmetro, enquanto a água é inserida pela região inferior do misturador (2/3 do diâmetro). Inicialmente, após passar pelo misturador, um escoamento bifásico no padrão estratificado é gerado o qual naturalmente faz transição para o escoamento no padrão em golfadas devido às combinações de velocidades superficiais das fases utilizadas neste trabalho.

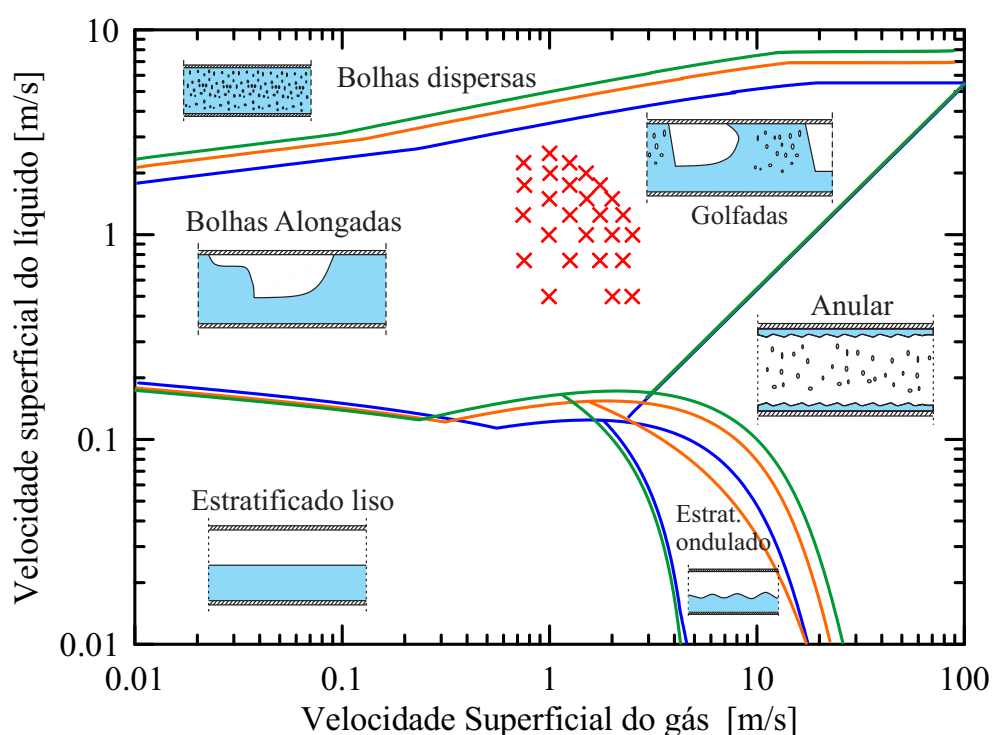
As velocidades superficiais das fases foram plotadas sobre o mapa de padrão de escoamento proposto por Taitel e Dukler (1976), como apresentado pela Figura 16. A extensão da tubulação⁵ que o escoamento percorre até ocorrer a transição entre os padrões estratificado e golfadas é garantida pela

⁵ Uma extensão máxima de aproximadamente 100 vezes o diâmetro (100D) foi observada experimentalmente e está de acordo com os resultados de estudos disponíveis na literatura de evolução inicial do escoamento em golfadas em tubulações horizontais (ADIBI *et al.*, 2014; AL-KAYIEM *et al.*, 2017; CONTE *et al.*, 2017; NYDAL *et al.*, 1992).

seção de desenvolvimento (10) posicionada antes da seção de testes (11) e depende das diferentes combinações de velocidades superficiais das fases e diâmetros internos da tubulação.

A seção de teste, posição da bancada experimental utilizada para realização das medições do gradiente de pressão em tubos lisos (TL) ⁶ e tubos corrugados (TC), foi posicionada a uma distância de 20 m do misturador, distância denominada de seção de desenvolvimento (10), a qual tem como objetivo garantir que o escoamento chegue o mais desenvolvido possível na seção de testes (11).

Figura 16 – Combinação das velocidades superficiais das fases utilizadas neste trabalho plotadas sobre o mapa de padrão de escoamento ar-água proposto por Taitel e Dukler (1976) para os diferentes diâmetros internos de tubulação. Linha azul: T26, Linha laranja: T40 e Linha verde: T50.



Após a seção de teste, uma extensão de aproximadamente 10 metros de tubulação de acrílico, seção pós-teste (12), foi utilizada para evitar efeitos reversos de saída e para transportar o escoamento bifásico até um separador ciclônico de fases (15), o qual está instalado em cima do reservatório de água. O separador, cujo diâmetro interno é de 300 mm, recebe tangencialmente o escoamento bifásico das três diferentes tubulações de acrílico e tem como objetivo facilitar a separação das fases impedindo que o ar entre, juntamente

⁶ A denominação tubo liso (TL) será utilizada neste trabalho para se referenciar aos tubos de acrílico que não foram usinados internamente e que tiveram a sua rugosidade interna desprezada.

com a água, na sucção da bomba. Registros de água (4) e gás (8) permitem a seleção do diâmetro interno da tubulação desejado para realização dos testes experimentais. As seções de testes de tubos corrugados tiveram os seus comprimentos determinados a partir de uma razão diâmetro interno/comprimento ($D/L = 0,010$) constante sendo 2,4, 3,7 e 4,6 m para os diâmetros internos de tubulação de 26, 40,8 e 50 mm, respectivamente. Um transdutor de pressão diferencial (14) com faixa de medição de 0 até 9807 Pa e precisão de 0,04% do span foi utilizado para medição do gradiente de pressão nas seções de testes. A tomada de pressão da tubulação foi feita a partir de um furo com diâmetro de 1,5 mm feito na parede da tubulação de acrílico. Para a tubulação corrugada teve-se o cuidado de garantir que o furo da tomada de pressão ficasse contido no espaço não usinado compreendido entre as cavidades (d).

A Tabela 4 apresenta um resumo das principais características do circuito experimental e dos testes experimentais utilizados neste estudo.

Tabela 4 – Características do circuito e testes experimentais.

Inclinação da tubulação	Horizontal
Diâmetro interno da tubulação (D)	26, 40,8 e 50 mm
Material da tubulação	Acrílico
Tipos de tubulação	Lisa (TL) e corrugada (TC)
Larguras das cavidades (w)	1,2, 1,6 e 2,0 mm
Comprimento das seções de testes	2,4 m para TC26 3,7 m para TC40 4,6 m para TC50
Fluidos	Ar e água
Padrão de escoamento bifásico	Golfadas
Temperatura	Ambiente
Pressão	Ambiente
Velocidade superficial de líquido	$0,5 \leq J_L \leq 2,5$ m/s
Velocidade superficial de gás	$0,75 \leq J_G \leq 2,5$ m/s
Reynolds da fase líquida	$12000 \leq Re_L \leq 130000$
Reynolds da fase gasosa	$1200 \leq Re_G \leq 8500$

A Tabela 5 apresenta os dados da instrumentação utilizada na bancada experimental do presente estudo.

Tabela 5 – Características da instrumentação utilizada na bancada experimental.

Equipamento	Faixa de operação
Coriolis de líquido para baixas vazões (CLB)	$\dot{m}_{Lmax}=5000$ kg/h
Coriolis de líquido para altas vazões (CLA)	$\dot{m}_{Lmax}=50000$ kg/h
Coriolis de gás para baixas vazões (CGB)	$\dot{m}_{Gmax}=100$ kg/h
Coriolis de gás para altas vazões (CGA)	$\dot{m}_{Gmax}=600$ kg/h
Transdutor de pressão diferencial (TPD)	0 a 9807 Pa
Transdutor de pressão manométrica (TPM)	0 a 1 MPa
Transdutor de pressão absoluta (TPA)	$P_{max}=24,8$ MPa

O controle das variáveis e a aquisição de dados do circuito experimental é feito a partir de um sistema supervisorio desenvolvido a partir do *software LABVIEW da National Instruments*.

3.3 PROCEDIMENTOS E ETAPAS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, são apresentados os procedimentos para a execução dos testes experimentais e a sequência de etapas experimentais adotadas. Antes de iniciar um teste experimental, quatro procedimentos eram realizados com o objetivo de estabelecer condições semelhantes para todos os testes experimentais, bem como, garantir confiabilidade e repetitividade das medições.

Os procedimentos utilizados são apresentados a seguir:

1. Escoamento monofásico com água no diâmetro de tubulação desejado para retirar bolhas de ar aprisionadas em conexões, curvas e registros da bancada experimental.
2. Inspeção dos furos das tomadas de pressão da tubulação para garantir a completa passagem da água para as mangueiras dos transdutores de pressão.
3. Verificação e retirada de bolhas de ar das mangueiras que conectam o transdutor de pressão com as tomadas de pressão.
4. Verificação dos valores registrados para o diâmetro interno da tubulação (D) e comprimento (L) de medição da pressão (ΔP) registrados no sistema supervisorio.

As etapas dos testes experimentais e as correlações da literatura utilizadas para comparações são apresentadas a seguir:

1. Medição do gradiente de pressão de um escoamento monofásico de água, nos diferentes diâmetros internos de tubulação lisa, para cálculo do fator de atrito experimental, a partir da Equação 3.4, e comparação com o fator de atrito teórico, obtido a partir da relação de Blasius, Equação 3.5, (FOX *et al.*, 2010).

$$f_{exp} = \frac{(\Delta P_{exp}/L) D^5 \pi^2}{8 \rho_L q_L^2} \quad (3.4)$$

onde f_{exp} é o fator de atrito experimental, $(\Delta P_{exp}/L)$ é o gradiente de pressão experimental, D é o diâmetro da tubulação, ρ_L é massa específica da água e q_L é a vazão volumétrica da água.

$$f_{Blasius} = 0,316 Re_L^{-0,25} \quad (3.5)$$

onde $f_{Blasius}$ é o fator de atrito de Blasius e Re_L é o número de Reynolds da água.

2. Medição do gradiente de pressão de um escoamento monofásico de água, nas diferentes tubulações corrugadas, para cálculo do fator de atrito experimental, a partir da Equação 3.4, e comparação dos resultados experimentais obtidos com o fator de atrito obtido pela correlação, Equação 3.6, proposta por Stel *et al.* (2012).

$$\frac{1}{\sqrt{f_{Stel}}} = -2,05 \log \left(\frac{w/D}{61,9} + \frac{2,3}{Re_L \sqrt{f_{Stel}}} \right) \quad (3.6)$$

onde f_{Stel} é o fator de atrito, w/D é a razão largura da cavidade pelo diâmetro interno da tubulação corrugada. A Equação 3.6 é válida para $5000 \leq Re_L \leq 100000$ e $0,015 \leq w/D \leq 0,04$.

3. Medição do gradiente de pressão de um escoamento bifásico ar-água, nas diferentes tubulações lisas, e comparação dos resultados com o modelo proposto por Lockhart e Martinelli (1949), Equação 3.7, utilizando o fator multiplicador do gradiente de pressão $(\phi^2|_L)$ proposto por Chisholm (1967), Equação 3.8.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{LG} = \phi^2|_L \left. \frac{dP}{dL} \right|_{SL} \quad (3.7)$$

$$\phi^2|_L = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2} \quad (3.8)$$

onde utilizou-se $C=20$.⁷

⁷ Valor proposto por Chisholm (1967) para quando ambas as fases escoam em regime turbulento.

4. Medição do gradiente de pressão de um escoamento bifásico ar-água, nas diferentes tubulações corrugadas, e comparação dos resultados com a predição de gradiente de pressão obtida a partir da correlação para o fator multiplicador proposta por Naidek *et al.* (2017).

$$\phi^2|_L = \max \left[0, 18 \ln \left(\frac{w}{D} \right) + 1, 88 ; 1 \right] \left[1 + \frac{1,6 Re_L^{0,31} Re_G^{-0,07}}{X} + \frac{1}{X^2} \right] \quad (3.9)$$

As comparações entre os resultados experimentais e predições, serão feitas pelo desvio percentual absoluto médio, calculado a partir da Equação 3.10, com o objetivo de obter um melhor entendimento dos comportamentos analisados.

$$d_p (\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{|r_{corr} - r_{exp}|}{r_{exp}} \right) \quad (3.10)$$

onde d_p é o desvio percentual, r_{corr} é o resultado obtido a partir de uma correlação e r_{exp} é o resultado obtido experimentalmente.

Os testes experimentais para o escoamento monofásico foram realizados para a faixa $10000 \leq Re_L \leq 80000$, com tempo de aquisição de dados de 60 segundos. Para os testes experimentais com escoamento bifásico foram utilizadas 26 combinações entre as velocidades superficiais da fase líquida ($0,5 \leq J_L \leq 2,5$ m/s) e gasosa ($0,75 \leq J_G \leq 2,5$ m/s), que proporcionam o padrão de escoamento em golfadas para os três diâmetros internos de tubulação utilizados neste trabalho. O tempo de aquisição dos dados experimentais do escoamento bifásico foi calculado a partir da correlação proposta por Vicencio *et al.* (2015), Equação 3.11, levando em consideração a frequência de passagem de 200 bolhas alongadas, como apresentado na Tabela 6. Os resultados experimentais para o gradiente de pressão, que serão apresentados no próximo capítulo, foram obtidos a partir da média aritmética entre os valores obtidos durante o tempo de aquisição de dados.

$$t_D = 200 \left(0,08 \frac{J_L}{D} \left(\frac{J_L}{J_G} \right)^{0,45} \right)^{-1} \quad (3.11)$$

onde o subíndice D representa o diâmetro interno da tubulação.

Tabela 6 – Combinações de velocidades superficiais das fases e tempos de aquisição dos dados experimentais bifásicos.

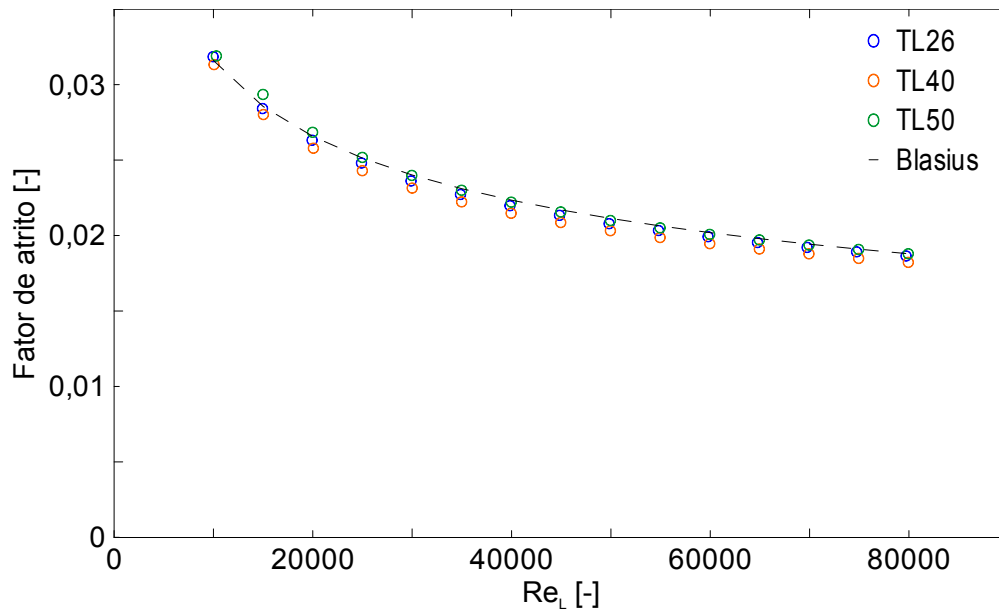
Ponto	J_L [m/s]	J_G [m/s]	t_{26} [s]	t_{40} [s]	t_{50} [s]
P01	0,75	0,75	87	136	167
P02	1,25	0,75	60	65	80
P03	1,75	0,75	60	60	60
P04	2,25	0,75	60	60	60
P05	0,50	1,00	178	278	342
P06	1,00	1,00	65	102	125
P07	1,50	1,00	60	60	70
P08	2,00	1,00	60	60	60
P09	0,75	1,25	110	171	210
P10	1,25	1,25	60	82	100
P11	1,75	1,25	60	60	62
P12	2,25	1,25	60	60	60
P13	0,50	1,50	214	334	410
P14	1,00	1,50	78	123	150
P15	1,50	1,50	60	68	84
P16	2,00	1,50	60	60	60
P17	0,75	1,75	127	199	244
P18	1,25	1,75	61	95	117
P19	1,75	1,75	60	60	72
P20	0,50	2,00	243	380	467
P21	1,00	2,00	89	139	171
P22	1,50	2,00	60	78	95
P23	0,75	2,25	143	223	274
P24	1,25	2,25	68	106	131
P25	0,50	2,5	269	420	516
P26	1,00	2,5	99	154	189

Para todos os testes experimentais, monofásico e bifásico em tubos lisos e corrugados de diferentes configurações geométricas, foram realizadas três baterias de medições (B1, B2 e B3), em dias diferentes, para verificação da repetitividade dos resultados. No total, foram realizadas 54 baterias de testes, aproximadamente 1150 medições de pontos experimentais. Uma análise das incertezas de medição e da repetitividade dos testes experimentais são apresentadas nos Apêndices B e C, respectivamente.

3.3.1 Validação do Procedimento Experimental

A Figura 17 apresenta o fator de atrito experimental de um escoamento monofásico de água em três diferentes diâmetros internos de tubulação lisa e o fator de atrito teórico calculado a partir da equação de Blasius ($f_{Blasius} = 0,316Re^{-0,25}$). Uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos proporcionou desvios percentuais absolutos máximos de 1,7%, 4% e 2,7% para os respectivos diâmetros internos de tubulação de 26, 40 e 50 mm. O fator de atrito experimental possui uma incerteza de medição de $\pm 1,5\%$ e o número de Reynolds da fase líquida uma incerteza de medição de $\pm 1,6\%$.

Figura 17 – Fator de atrito para um escoamento monofásico de água em tubulações lisas de diferentes diâmetros internos em relação ao número de Reynolds.



É sabido que o fator de atrito é muito sensível ao diâmetro interno da tubulação, isso devido ao fato de o diâmetro estar elevado à quinta potência no cálculo do mesmo ($f_{exp} = [(\Delta P_{exp}/L) D^5 \pi^2] / [8 \rho_L q_L^2]$). Sabe-se também que os tubos de acrílico utilizados na bancada experimental possuem uma tolerância dimensional de $\pm 0,3$ mm para o diâmetro interno.⁸ Dessa forma, os desvios percentuais obtidos inferiores a 5% proporcionam uma boa concordância entre experimento e teoria e podem ser utilizados como validação da bancada experimental, bem como para proporcionar confiabilidade dos resultados experimentais adquiridos a partir desse aparato.

⁸ Valor de tolerância fornecido pelo fabricante da tubulação de acrílico.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados experimentais, bem como as análises realizadas para os testes monofásicos com água e os testes bifásicos ar-água em tubos lisos e corrugados de diferentes larguras de cavidades e diâmetros internos. Para os testes monofásicos, as análises e comparações com correlações da literatura são conduzidas a partir dos resultados obtidos para o fator de atrito e o gradiente de pressão. Para os testes bifásicos, o enfoque principal será a análise do gradiente de pressão e do fator multiplicador do gradiente de pressão. Por conveniência, foram adotadas siglas para referenciar as tubulações lisas (TLD) de diferentes diâmetros (D) e tubulações corrugadas (TCD-w) de diferentes diâmetros (D) e larguras de cavidade (w).

4.1 TESTES PARA O ESCOAMENTO MONOFÁSICO

A Figura 18 apresenta o gradiente de pressão para um escoamento monofásico com água nas diferentes configurações de tubulação corrugada e tubulação lisa em função do número de Reynolds da fase líquida. Observa-se que o gradiente de pressão aumenta com o aumento da largura da cavidade do tubo corrugado (w), comportamento observado para os diferentes diâmetros internos de tubulação corrugada, Figura 18 (a), (b) e (c).

Comparando os gradientes de pressão para o escoamento monofásico entre as tubulações lisa (TL) e corrugada (TCD-1,2), percebe-se uma maior diferença para a tubulação de menor diâmetro interno (T26), Figura 18 (a), com desvio percentual médio de 26% entre TL e TC26-1,2. Para os maiores diâmetros internos, observa-se um desvio percentual médio de 7% e 3% para as tubulações T40 e T50, respectivamente. Esse comportamento, provavelmente, está relacionado com a influência que as características geométricas das cavidades dos tubos corrugados (d/D e w/D) possuem em relação ao diâmetro interno da tubulação. Os tubos corrugados deste trabalho, foram fabricados com diferentes larguras de cavidades ($w=1,2, 1,6$ e $2,0$ mm) e mantendo o passo ($p=3,9$ mm) entre as cavidades constante, o que proporciona uma variação da distância (d) entre as cavidades para cada alteração da largura da cavidade. Por esse motivo, nas análises apresentadas neste capítulo, também serão consideradas as influências das razões d/D e w/D , que têm seus valores novamente apresentados na Tabela 7.¹

¹ A altura da cavidade (h) não foi considerada por já ter sido comprovado pelos autores

A Figura 18 (d) apresenta os resultados do gradiente de pressão de um escoamento monofásico para as diferentes configurações de tubulação.

Figura 18 – Gradiente de pressão de um escoamento monofásico com água em tubulações lisas e corrugadas de diferentes diâmetros internos e larguras de cavidade. (a) T26 , (b) T40 (c) T50, (d) Todas as configurações de tubulação.

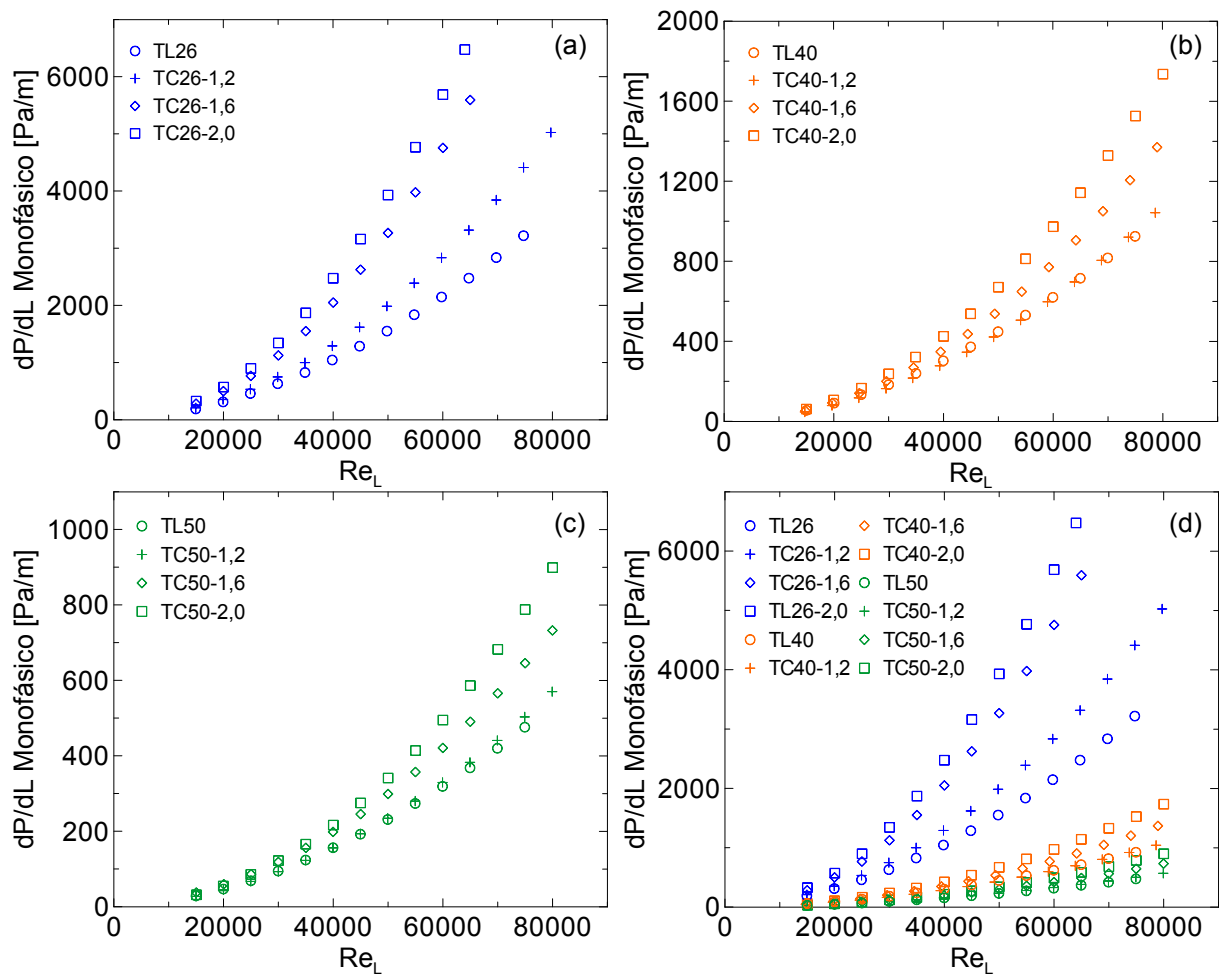


Tabela 7 – Características geométricas das cavidades das tubulações corrugadas.

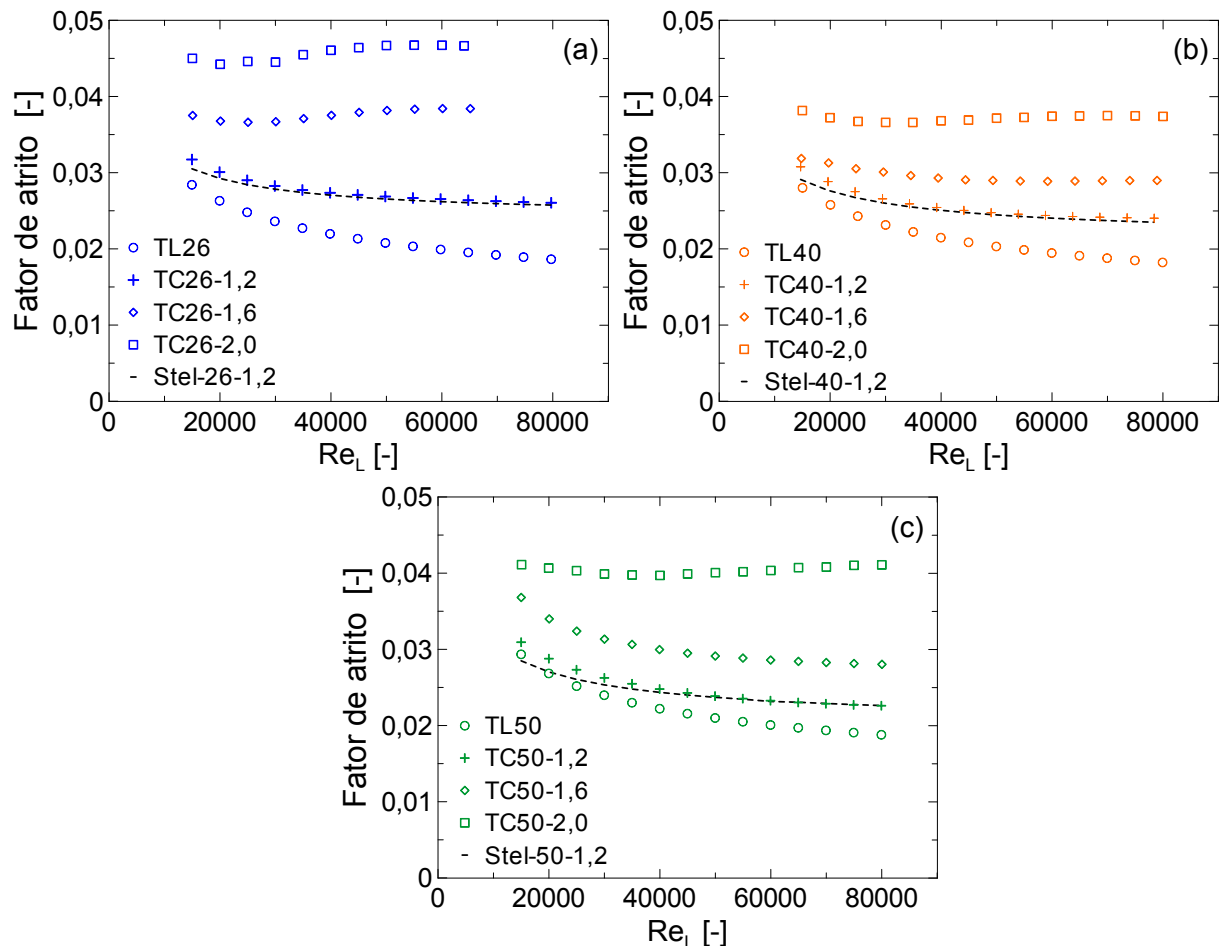
D [mm]	d/D [-]	w/D [-]	D [mm]	d/D [-]	w/D [-]	D [mm]	d/D [-]	w/D [-]
26	0,104	0,046	40,8	0,066	0,029	50	0,054	0,024
	0,088	0,062		0,056	0,039		0,046	0,032
	0,073	0,077		0,047	0,049		0,038	0,040

Stel *et al.* (2012) e Naidek *et al.* (2017) que essa variável não afeta o comportamento do escoamento principal em tubulações corrugadas do “tipo d”.

É possível perceber que o gradiente de pressão aumenta com a diminuição do diâmetro interno da tubulação (D) e com o aumento do número de Reynolds².

A Figura 19 apresenta os resultados do fator de atrito para o escoamento monofásico com água em diferentes tubulações corrugadas e tubulação lisa. É possível observar que a tendência de comportamento da curva do fator de atrito para as tubulações corrugadas com largura de cavidade de 1,2 mm é igual à tendência da curva do fator de atrito em tubulação lisa, onde o fator de atrito é dependente do número de Reynolds. Observa-se um fator de atrito maior para baixos números de Reynolds, e com o aumento de Re_L o fator de atrito tende a diminuir até ficar aproximadamente constante.

Figura 19 – Fator de atrito em função do número de Reynolds para as diferentes configurações de tubos corrugados. (a) T26, (b) T40 e (c) T50.



Analisando o comportamento do fator de atrito para as maiores larguras de cavidade (1,6 e 2 mm) na tubulação TC26, percebe-se que a tendência

² Os autores Hamad *et al.* (2017) e Lu *et al.* (2018) também observaram o aumento do gradiente de pressão com a diminuição do diâmetro interno da tubulação e aumento do número de Reynolds.

da curva do fator de atrito apresenta um comportamento diferente do observado para a tubulação lisa, o mesmo comportamento é observado para as cavidades com largura de 2,0 mm nas tubulações TC40 e TC50. O fator de atrito tem oscilações entre decréscimo e acréscimo e depois permanece aproximadamente constante. Esse comportamento é característico em fatores de atrito de escoamentos “completamente rugosos”, onde o fator de atrito é função apenas da rugosidade da superfície, que no caso dos tubos corrugados está sendo representada pelas razões w/D e d/D , independentemente do número de Reynolds.³ A tendência da curva do fator de atrito para as cavidades com largura de 1,6 mm e 2,0 mm não descaracteriza as cavidades dos tubos corrugados deste estudo como sendo do “tipo d”, visto que as dimensões das cavidades utilizadas para os tubos corrugados do presente trabalho seguem as especificações de classificação do tipo de cavidade proposta por Perry *et al.* (1969) e Jiménez (2004).

Analizando os efeitos que as características geométricas das cavidades possuem sobre o fator de atrito, observa-se que o maior fator de atrito ocorre para a tubulação de menor diâmetro e maior largura de cavidade, a qual possui um maior gradiente de pressão e as maiores combinações entre as razões $w/D=0,077$ e $d/D=0,073$. Comparando os resultados experimentais para o fator de atrito com a predição obtida a partir da equação proposta por Stel *et al.* (2012), linha tracejada da Figura 19, para a largura de cavidade de 1,2 mm⁴, observa-se desvios percentuais absolutos médios de 1,6%, 2,1% e 2,2% e desvios percentuais absolutos máximos de 3,9%, 5,4% e 8%, para os diâmetros internos de 26, 40,8 e 50 mm, respectivamente.

Uma análise mais detalhada para o fator de atrito de um escoamento monofásico em função da largura da cavidade e do diâmetro interno das tubulações corrugadas, o que não é o foco deste estudo, teria que ser feita mantendo as razões w/D e d/D constantes, para os diferentes diâmetros interno de tubulação para assim avaliar detalhadamente o comportamento do fator de atrito em função destas razões.

4.2 TESTES PARA O ESCOAMENTO BIFÁSICO

Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais obtidos para o escoamento bifásico ar-água. Primeiramente, são apresentados os re-

³ A definição de escoamento “completamente rugoso” foi proposta por Nikuradse (1933) que estudou a influência da rugosidade no fator de atrito de escoamentos turbulentos e definiu a “rugosidade de grão de areia” como uma rugosidade equivalente que representa em média os efeitos de uma superfície coberta por grãos de areia de magnitude especificada.

⁴ As demais larguras de cavidade estão fora da faixa de especificações estabelecida por Stel *et al.* (2012) e por isso não foram analisadas.

sultados do gradiente de pressão para tubulação lisa e posteriormente é apresentado os resultados para o gradiente de pressão e fator multiplicador de Lockhart-Martinelli em tubulação corrugada.

4.2.1 Escoamento em Tubos Lisos

Os resultados experimentais para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulações lisas de diferentes diâmetros internos apresentam o mesmo comportamento observado para o gradiente de pressão de um escoamento monofásico em tubulações corrugadas, ou seja, o gradiente de pressão é maior para menores diâmetros de tubulação e tende a aumentar com o aumento do número de Reynolds da fase líquida, Figura 20.

Uma comparação dos resultados experimentais do gradiente de pressão em tubulação lisa com os valores calculados a partir da correlação proposta por Lockhart e Martinelli (1949), utilizando o fator multiplicador proposto por Chisholm (1967) ($C=20$), proporcionou um desvio percentual absoluto máximo de 17% e desvios percentuais absolutos médios de 3,95%, 5,54% e 5,46% para os diâmetros internos de 26, 40,8 e 50 mm, respectivamente, como pode ser observado na Figura 21. Os desvios percentuais absolutos observados na comparação com a correlação Lockhart e Martinelli (1949) para o escoamento bifásico em tubos lisos estão coerentes com o desvio percentual absoluto médio de 12,7% observado por Xu *et al.* (2012).

Figura 20 – Resultados experimentais para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação lisa com diferentes diâmetros.

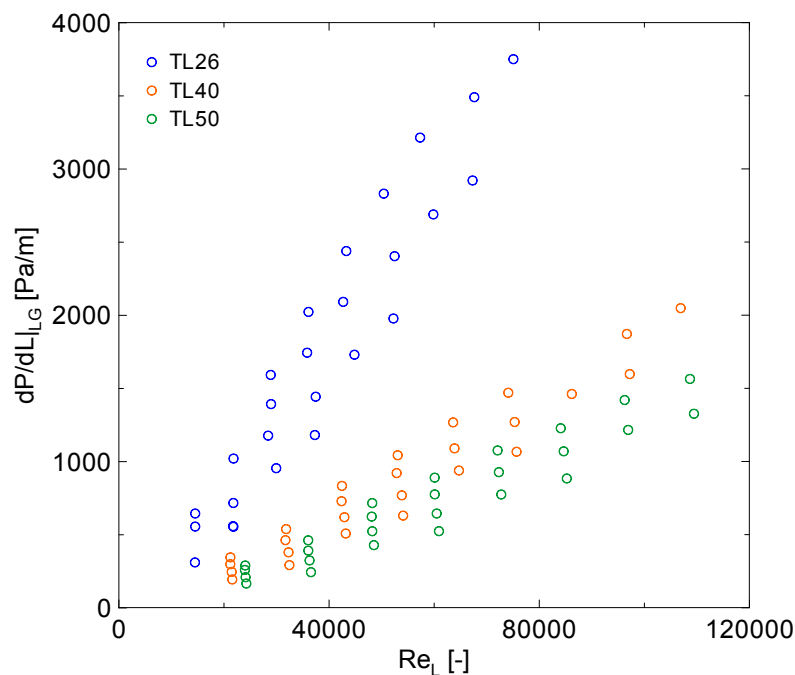
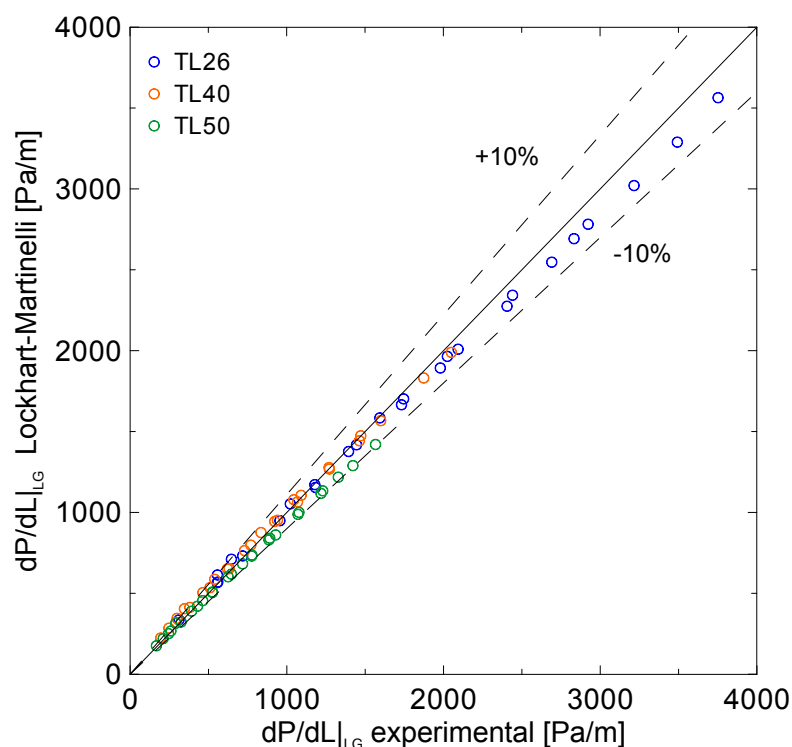


Figura 21 – Comparação do gradiente de pressão bifásico em tubulação lisa com o gradiente de pressão calculado pela correlação de Lockhart-Martinelli.



4.2.2 Escoamento em Tubos Corrugados

A Figura 22 apresenta os resultados experimentais para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico nas diferentes configurações de tubulação corrugada.⁵ No total, foram realizados 234 testes experimentais em diferentes configurações de tubulação corrugada.⁶ Assim como verificado para os testes monofásicos, o gradiente de pressão de um escoamento bifásico também aumenta com o aumento da largura da cavidade do tubo corrugado e com a diminuição do diâmetro interno da tubulação.

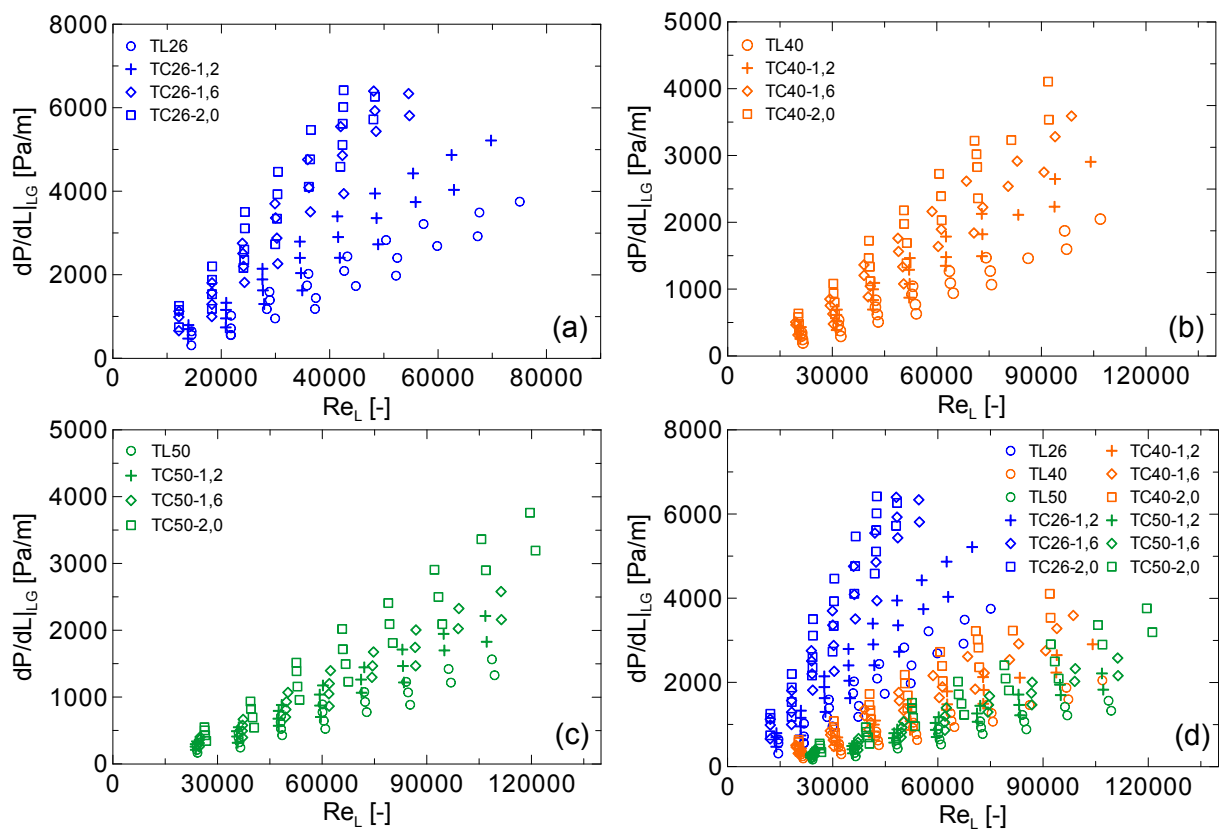
Comparando o gradiente de pressão para um escoamento bifásico entre as tubulações lisas e corrugadas, observaram-se desvios percentuais médios de 40% entre a TL e a TC26-1,2, 40% entre a TL40 e a TC40-1,2 e 34% entre a TL50 e a TC50-1,6. Observa-se que o gradiente de pressão bifásico possui diferenças significativas, entre a tubulação lisa e a tubulação corrugada de menor largura de cavidade ($w=1,2$ mm), para os três diâmetros de tubulação, Figura 22 (a), (b) e (c). O mesmo comportamento não foi observado para o gradiente de pressão monofásico, onde apenas o gradiente de pressão da TC26-1,2 teve uma diferença significativa, com desvio percentual médio

⁵ Os resultados do gradiente de pressão em tubulação lisa também são apresentados para facilitar as comparações realizadas.

⁶ Os dados experimentais dos testes em tubos corrugados são apresentados no Apêndice D.

de 26% quando comparada com o gradiente de pressão da TL26. Este comportamento, entre as variações do gradiente de pressão entre TL e TC com $w=1,2$ mm, possivelmente pode demonstrar que o escoamento bifásico é mais sensível (quando comparado ao escoamento monofásico) às alterações proporcionadas pelas cavidades dos tubos corrugados. Essa maior sensibilidade do escoamento bifásico pode ter relação com alterações nos parâmetros geométricos e cinemáticos que caracterizam o padrão de escoamento bifásico em golfadas, como por exemplo, o comprimento do pistão de líquido, comprimento da bolha alongada, quantidade de bolhas dispersas no pistão de líquido, velocidade do pistão de líquido e frequência da célula unitária, uma vez que a variação da geometria da cavidade (w/D e d/D) pode proporcionar alterações desses parâmetros. A Figura 22 (d) apresenta uma síntese de todos os resultados para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico nas diferentes configurações de tubulação.

Figura 22 – Gradiente de pressão bifásico experimental para tubulação corrugada com diferentes diâmetros internos e diferentes larguras de cavidade. (a) T26, (b) T40, (c) T50 e (d) Todas as configurações de tubulação.



As Figuras 23 e 24 apresentam imagens para o escoamento bifásico ar-água no padrão golfadas para os diâmetros de tubulação de 26 mm e 50

mm, respectivamente, em tubulação lisa e corrugada com largura de cavidade de 1,2 mm.

Figura 23 – Imagens para o escoamento bifásico ar-água no padrão gol-fadas na tubulação com diâmetro interno de 26 mm. (a) Tubulação lisa (TL26), (b) Tubulação corrugada com $w=1,2$ mm (TC26-1,2).

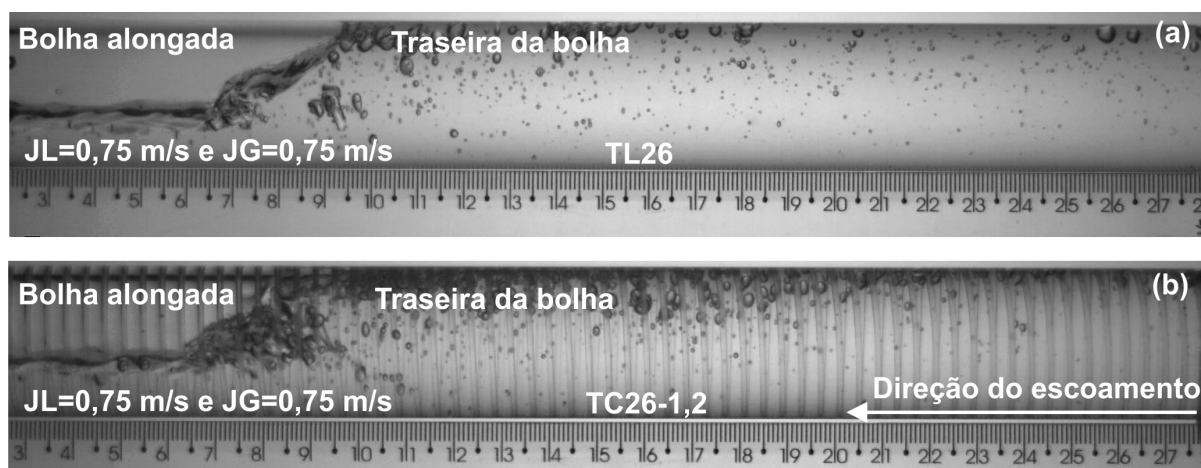
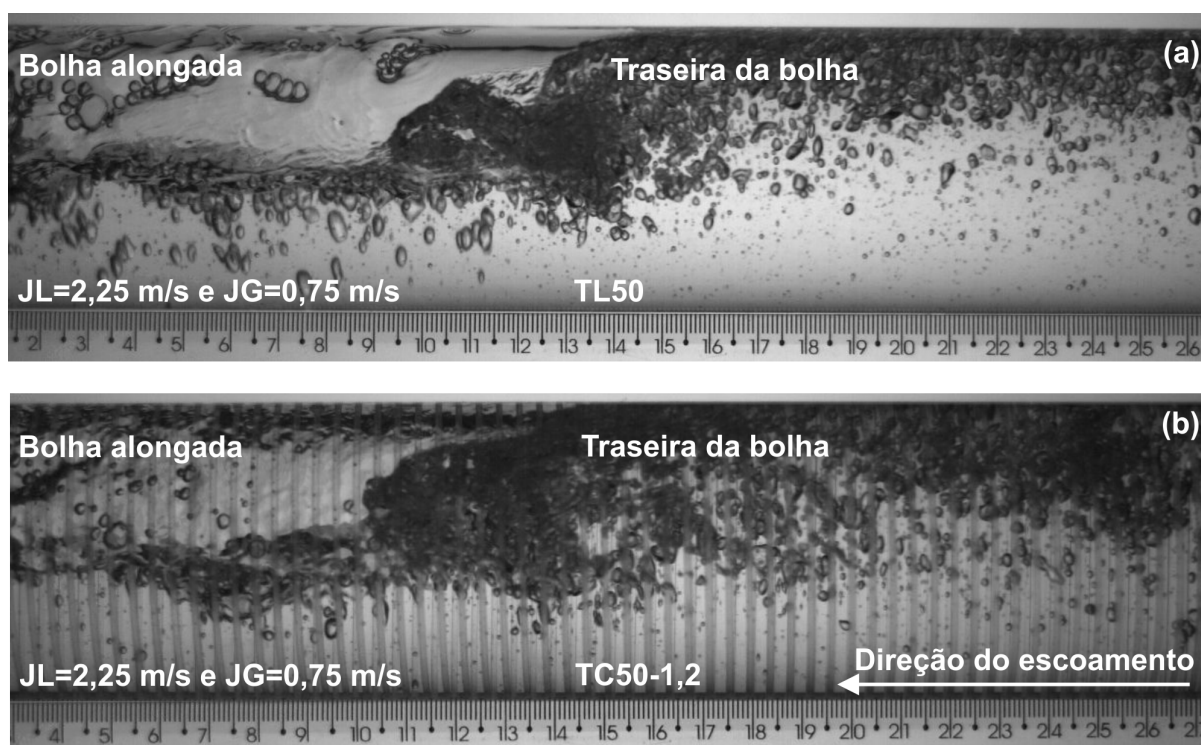


Figura 24 – Imagens para o escoamento bifásico ar-água no padrão gol-fadas na tubulação com diâmetro interno de 50 mm. (a) Tubulação lisa (TL50), (b) Tubulação corrugada com $w=1,2$ mm (TC50-1,2).



Comparando as Figuras 23 (a) e (b), observa-se uma maior quantidade de bolhas dispersas na região da traseira da bolha alongada para a tubulação corrugada (TC26-1,2), o que possivelmente está relacionado com a presença das cavidades, já que a única diferença entre os dois escoamentos é a presença das cavidades da tubulação corrugada. O mesmo fenômeno é observado para o maior diâmetro de tubulação, Figura 24 (a) e (b), com a diferença que as velocidades superficiais das fases são diferentes, o que proporciona uma maior presença de bolhas na região da traseira da bolha quando comparado com a Figura 23.

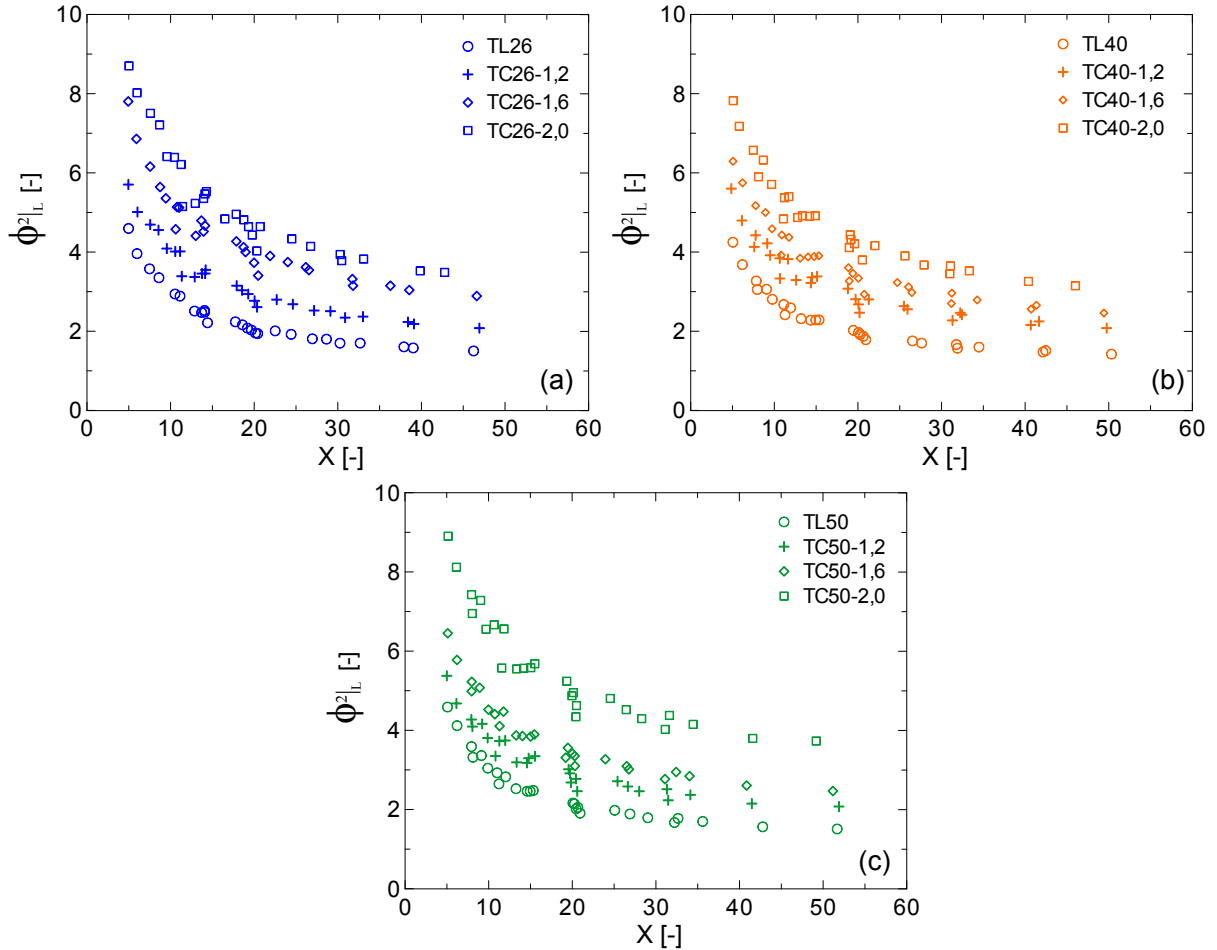
Uma análise do gradiente de pressão do escoamento bifásico para as diferentes larguras de cavidade, para um diâmetro interno constante, mostra desvios percentuais absolutos médios de 38% entre as TC26-1,2 e TC26-1,6, 19% entre as TC26-1,6 e TC26-2,0 e 60% entre as tubulações TC26-1,2 e TC26-2,0. Para a tubulação com diâmetro interno de 40 mm, observam-se desvios percentuais absolutos médios de 23%, 28% e 53% entre as respectivas tubulações TC40-1,2 e TC40-1,6, TC40-1,6 e TC40-2,0 e TC40-1,2 e TC40-2,0. Para o maior diâmetro interno de tubulação, têm-se desvios percentuais absolutos médios de 20%, 42% e 70% para as TC50-1,2 e TC50-1,6, TC50-1,6 e TC50-2,0 e TC50-1,2 e TC50-2,0, respectivamente.

A Figura 25 mostra o comportamento do fator multiplicador do gradiente de pressão experimental de um escoamento bifásico ($\phi^2|_L$) em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli (X) para tubos lisos e corrugados.

É possível identificar quatro curvas, as quais possuem uma mesma tendência, onde a curva com os menores valores para o fator multiplicador corresponde aos resultados da tubulação lisa. Observa-se que o fator multiplicador também tende a aumentar com o aumento da largura da cavidade dos tubos corrugados, fenômeno observado para os diferentes diâmetros internos de tubulação, como apresentado pelas Figuras 25 (a), (b) e (c).

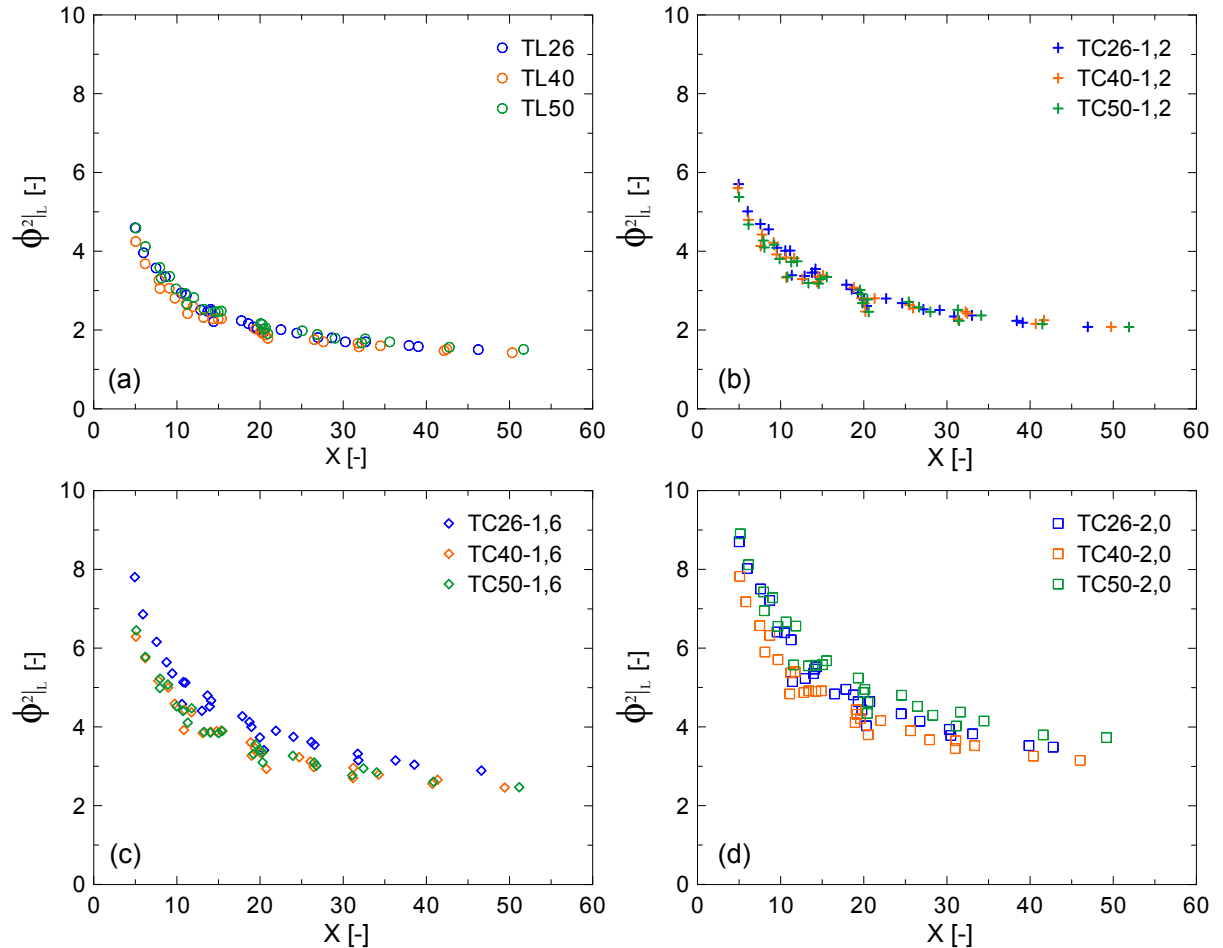
A Figura 26 apresenta o efeito que o diâmetro interno da tubulação exerce sobre o fator multiplicador do gradiente de pressão. Observa-se que para as diferentes tubulações lisas, Figura 26 (a), e tubulações corrugadas com largura de cavidade de 1,2 mm, Figura 26 (b), não ocorre uma mudança significativa nos valores do fator multiplicador do gradiente de pressão bifásico. Fazendo comparação entre os diferentes diâmetros de tubulação corrugada com $w=1,2$ mm para $X=20$ observa-se um desvio percentual de aproximadamente 2%, 1% e 3% entre as tubulações TC26-1,2 e TC40-1,2, TC40-1,2 e TC50-1,2 e tubulações TC26-1,2 e TC50-1,2, respectivamente.

Figura 25 – Fator multiplicador do gradiente de pressão de um escoamento bifásico em relação ao parâmetro de Lockhart-Martinelli para os diferentes diâmetros de tubulação. (a) T26, (b) T40 e (c) T50.



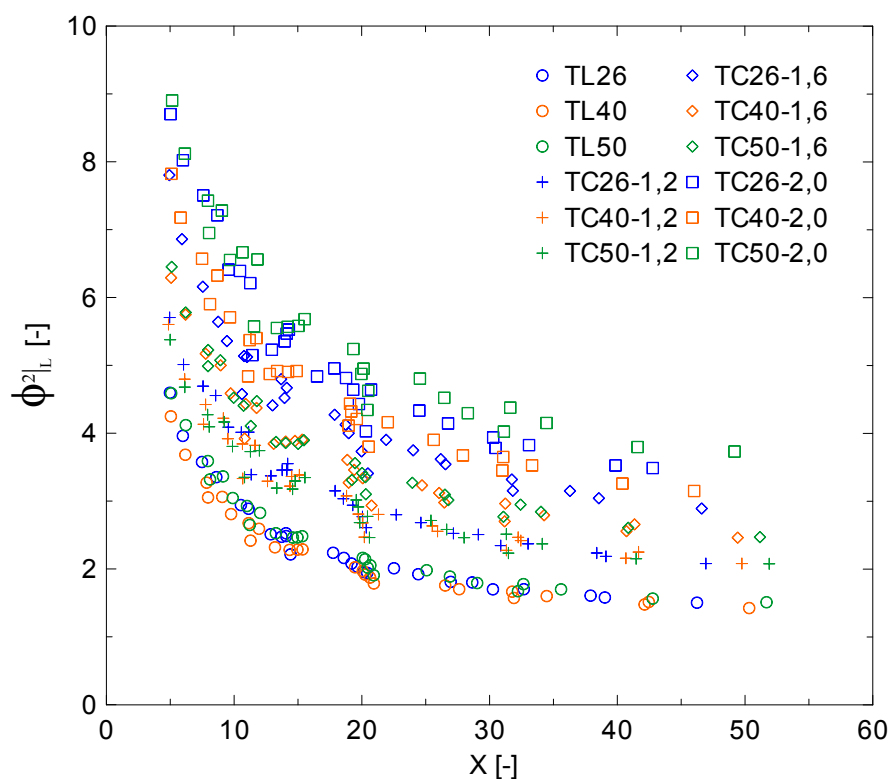
Contudo, analisando as larguras de cavidade 1,6 e 2,0 mm, Figura 26 (c) e (d), respectivamente, percebe-se uma diferença mais pronunciada entre os fatores multiplicadores dos diferentes diâmetros internos de tubulação. Para a largura de cavidade de 1,6 mm, observa-se que a tubulação de diâmetro interno de 26 mm possui maiores valores para o fator multiplicador em relação aos outros dois diâmetros internos. Para $X=20$, observa-se desvios percentuais de 14%, 6% e 9% entre os fatores multiplicadores das tubulações TC26-1,6 e TC40-1,6, TC40-1,6 e TC50-1,6 e tubulações TC26-1,6 e TC50-1,6, respectivamente. Analisando a largura de cavidade de 2 mm, tem-se que o diâmetro interno de 50 mm possui um maior fator multiplicador em comparação aos demais diâmetros, com desvios percentuais entre os fatores multiplicadores para $X=20$, de 6% entre as tubulações TC26-2,0 e TC40-2,0, 14% entre TC40-2,0 e TC50-2,0 e 8% entre as tubulações TC26-2,0 e TC50-2,0.

Figura 26 – Fator multiplicador do gradiente de pressão de um escoamento bifásico em relação ao parâmetro de Lockhart-Martinelli para tubulação lisa e tubulação corrugada de diferentes configurações geométricas. (a) TLD, (b) TCD-1,2, (c) TCD-1,6 e (d) TCD-2,0.



A Figura 27 mostra uma síntese dos resultados para o fator multiplicador experimental do gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação lisa e corrugada. Comparando os resultados para as diferentes configurações de tubulação, percebe-se que a TC50-2,0 possui o maior fator multiplicador experimental mesmo tendo um gradiente de pressão bifásico menor quando comparada como a tubulação TC26-2,0, o que possivelmente demonstra a influência das características geométricas da cavidade no fator multiplicador do gradiente de pressão bifásico.

Figura 27 – Fator multiplicador do gradiente de pressão de um escoamento bifásico em relação ao parâmetro de Lockhart-Martinelli para tubulações lisas e corrugadas.



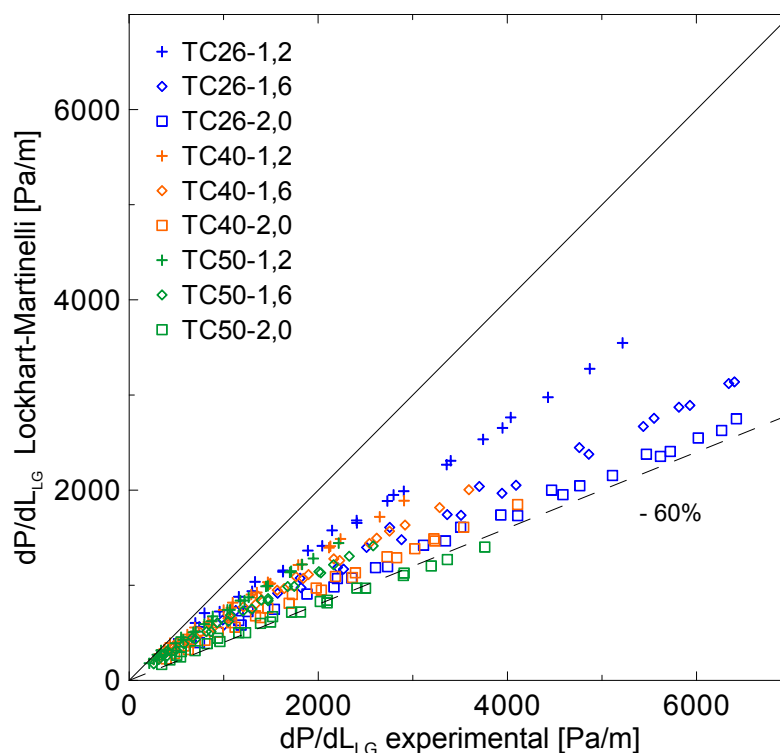
4.2.3 Comparação dos Resultados Experimentais com Correlações da Literatura

Nesta seção, são apresentadas comparações entre os resultados experimentais do gradiente de pressão de um escoamento bifásico horizontal ar-água em tubos corrugados com as correlações de predição presentes na literatura.

A Figura 28 apresenta a comparação entre os resultados experimentais com a predição calculada a partir da correlação proposta por Lockhart e Martinelli (1949) utilizando o fator multiplicador de Chisholm (1967) ($C = 20$). Observa-se que os resultados obtidos a partir da correlação de Lockhart e Martinelli (1949) subestimam os resultados experimentais com um desvio percentual absoluto máximo de 63%, obtido para a tubulação de maior diâmetro interno com maior largura de cavidade (TC50-2,0), e um desvio percentual mínimo de 32% para a tubulação TC26-1,2. A comparação apresentada pela Figura 28 demonstra que a correlação de Lockhart e Martinelli (1949) não é adequada para predição do gradiente de pressão bifásico em tubos corrugados, comportamento já esperado pelo fato da correlação de Lockhart e Martinelli (1949) ter sido proposta para predizer o gradiente de pressão de um

escoamento bifásico em tubulação lisa.

Figura 28 – Comparação entre o gradiente de pressão experimental de um escoamento bifásico em tubos corrugados com a predição pela equação de Lockhart e Martinelli.

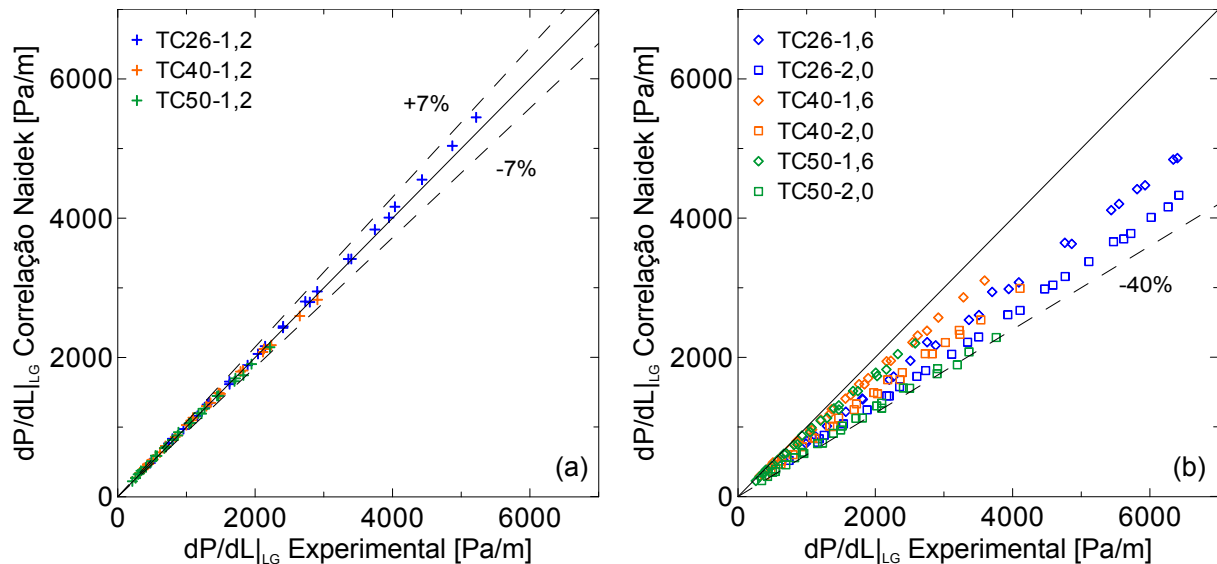


A Figura 29 mostra uma comparação entre os resultados experimentais do gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubos corrugados com a predição calculada a partir da correlação proposta por Naidek *et al.* (2017). Analisando a comparação para os diferentes diâmetros internos com largura de cavidade de 1,2 mm, Figura 29 (a), observam-se desvios percentuais absolutos máximos de 4,7%, 8% e 10,8% para os respectivos diâmetros internos de 26, 40,8 e 50 mm. Esta comparação, a qual mantém a largura da cavidade constante ($w=1,2$ mm), onde $w=1,2$ mm é próximo do limite máximo estabelecido pelos autores, demonstra a princípio, que a correlação proposta por Naidek *et al.* (2017) é capaz de prever com boa concordância⁷ o gradiente de pressão bifásico em tubos corrugados de diferentes diâmetros desde que a largura de cavidade esteja dentro da faixa de especificações estabelecidas pelos autores. Ao analisar as outras larguras de cavidade, Figura 29 (b), tem-se que os desvios percentuais aumentam e observa-se um desvio percentual absoluto máximo de 40% para a tubulação TC50-2,0. Contudo, percebe-se que os resultados para as diferentes configurações de tubulação corrugada diferem dos valores experimentais de forma retilínea, comportamento que pode

⁷ O valor de $\pm 7\%$ para o desvio percentual máximo foi estabelecido pelos autores como boa concordância.

sugerir a presença de um erro sistemático na predição feita a partir da correlação proposta por Naidek *et al.* (2017).

Figura 29 – Comparação entre os resultados experimentais com a predição calculada com a correlação proposta por Naidek *et al.* (2017).



Naidek *et al.* (2017) propuseram que o gradiente de pressão bifásico em tubulações corrugadas poderia ser obtido a partir da inserção de um novo fator multiplicador que acrescenta as influências das cavidades da tubulação corrugada a partir da razão w/D . Os autores não avaliaram a razão d/D pois os tubos corrugados utilizados tinham a distância entre as cavidades constante. A falta da razão d/D no fator multiplicador proposto por Naidek *et al.* (2017) pode estar relacionada com os elevados desvios percentuais observados entre a predição feita pela correlação e os dados experimentais do presente estudo.

A partir das comparações entre os resultados experimentais e as predições feitas com correlações da literatura, observou-se que a correlação proposta por Lockhart e Martinelli (1949) não é recomendada para prever o gradiente de pressão em tubulações corrugadas. A correlação proposta por Naidek *et al.* (2017) tem uma boa concordância quando utilizada dentro das faixas de especificações estabelecidas pelos autores e quando utilizada fora da faixa de recomendação apresenta um desvio com os resultados experimentais que aparenta ser devido a um erro sistemático.

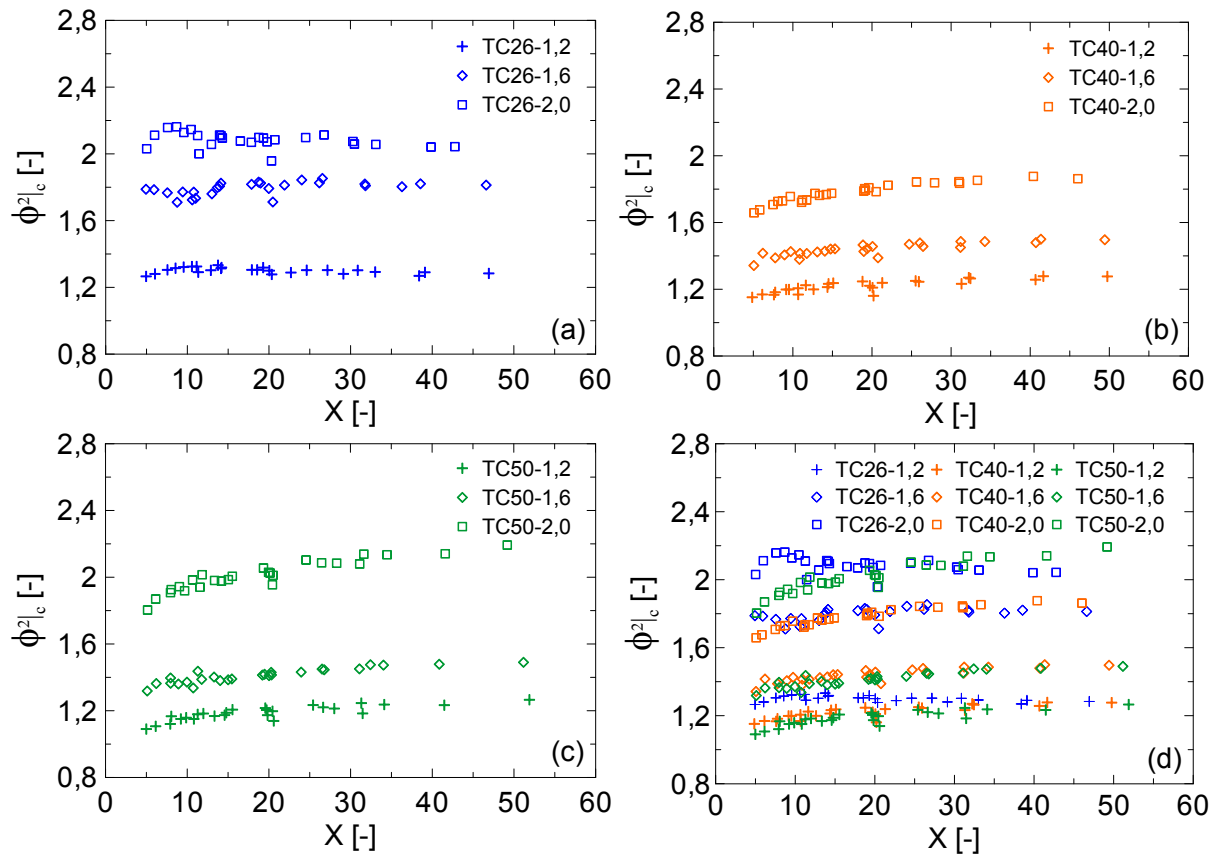
A próxima seção apresenta uma análise do fator multiplicador devido à inserção das cavidades do tubo corrugado, que no presente estudo será nomeado como fator multiplicador corrugado ($\phi^2|_c$). Esse fator multiplicador foi proposto por Naidek *et al.* (2017) e acrescenta os efeitos que as cavidades

de um tubo corrugado proporcionam ao escoamento no fator multiplicador total do gradiente de pressão bifásico.

4.3 ANÁLISE DO FATOR MULTIPLICADOR CORRUGADO

A Figura 30 apresenta os resultados experimentais para o fator multiplicador corrugado ($\phi^2|_c$), calculado a partir do fator multiplicador experimental total ($\phi^2|_L$), e utilizando o coeficiente C em função dos números de Reynolds de cada fase,⁸ como apresentado pela Equação 4.1, para os diferentes diâmetros de tubulação corrugada, Figura 30 (a), (b) e (c).

Figura 30 – Fator multiplicador devido aos efeitos das cavidades do tubo corrugado em relação ao parâmetro de Lockhart e Martinelli. (a) TC26-w, (b) TC40-w, (c) TC50-w e (d) Todas as configurações de TC.



$$\phi^2|_c = \phi^2|_L \left(1 + \frac{1,6 Re_L^{0,31} Re_G^{-0,07}}{X} + \frac{1}{X^2} \right)^{-1} \quad (4.1)$$

⁸ Coeficiente proposto por Vaze e Banerjee (2013).

O fator multiplicador corrugado ($\phi^2|_c$) tem um comportamento aproximadamente constante,⁹ com valores mínimos, médios, máximos e desvio padrão apresentados na Tabela 8, e tende a aumentar com o aumento da largura da cavidade da tubulação corrugada. Na Figura 30 (d) é possível observar que para configurações distintas de tubulação corrugada tem-se um $\phi^2|_c$ semelhante, como por exemplo para as tubulações TC26-1,6 e TC40-2,0 que apresentaram os respectivos valores médios de 1,79 e 1,78 e as tubulações TC26-2,0 e TC50-2,0 com $\phi^2|_c$ médio igual a 2,08 e 2,01, respectivamente.

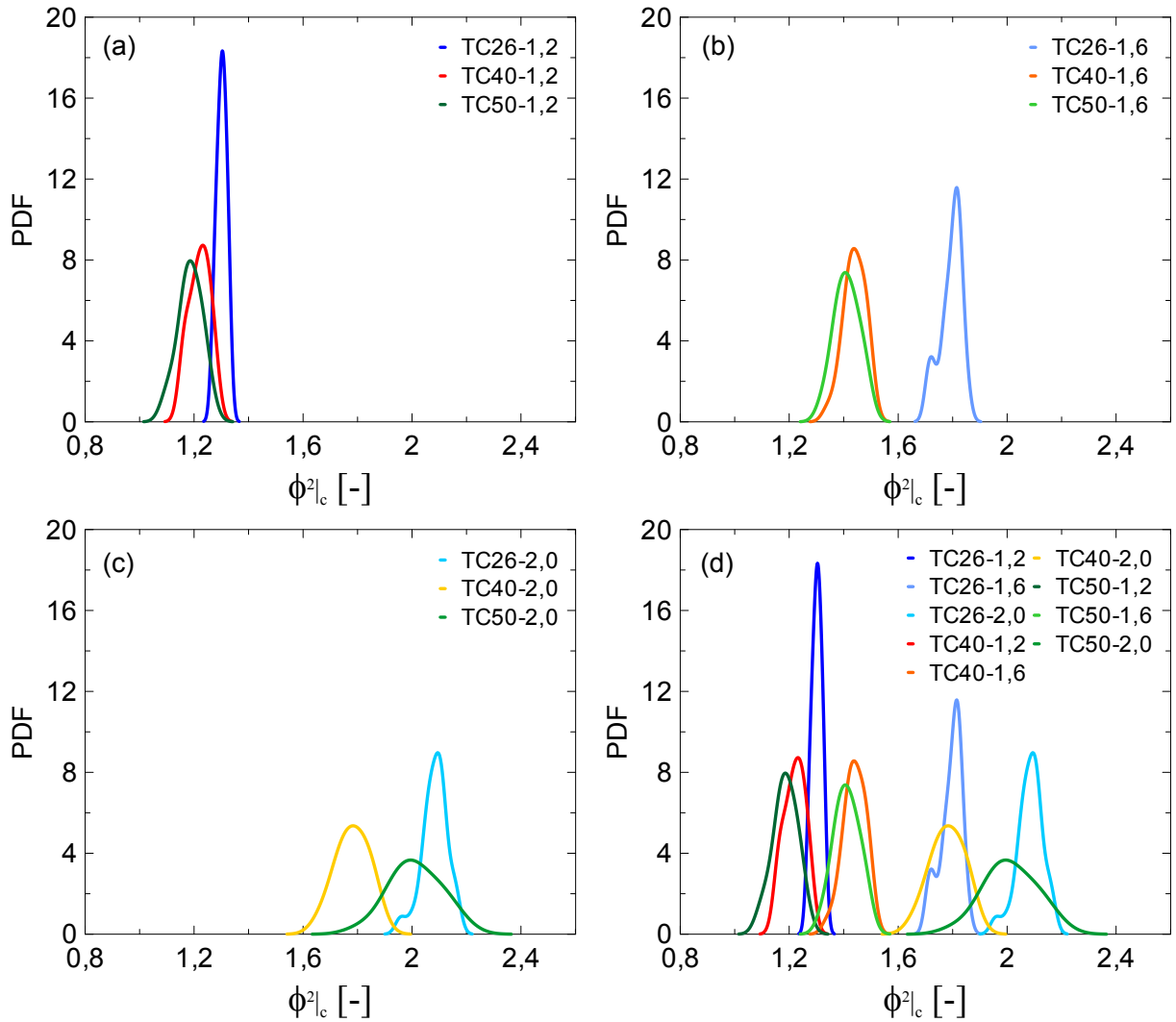
Tabela 8 – Fator multiplicador corrugado para as distintas configurações de tubulação corrugada.

Tubulação	$\phi^2 _c$ mínimo [-]	$\phi^2 _c$ médio [-]	$\phi^2 _c$ máximo [-]	Desvio Padrão
TC26-1,2	1,27	1,30	1,33	0,02
TC26-1,6	1,71	1,79	1,85	0,04
TC26-2,0	1,96	2,08	2,16	0,05
TC40-1,2	1,15	1,22	1,28	0,04
TC40-1,6	1,34	1,44	1,50	0,04
TC40-2,0	1,66	1,78	1,88	0,06
TC50-1,2	1,09	1,19	1,27	0,04
TC50-1,6	1,32	1,41	1,49	0,05
TC50-2,0	1,80	2,01	2,19	0,09

A Figura 31 apresenta a função densidade de probabilidade (PDF) para $\phi^2|_c$, onde observa-se que para a menor largura de cavidade, Figura 31 (a), os diferentes diâmetros possuem um fator multiplicador corrugado médio próximo (1,30, 1,22 e 1,19 para os diâmetros de 26, 40,8 e 50 mm, respectivamente), e um maior pico da curva PDF para a tubulação TC26-1,2. Com o aumento da largura da cavidade para 1,6 mm, Figura 31 (b), observa-se que as tubulações com diâmetros interno de 40,8 e 50mm ainda possuem um valor médio de $\phi^2|_c$ próximo (1,44 e 1,41, respectivamente), enquanto que o valor médio da tubulação TC26-1,6 é 1,79. Para a maior largura de cavidade Figura 31 (b), observa-se uma maior dispersão dos resultados para ambas as tubulações.

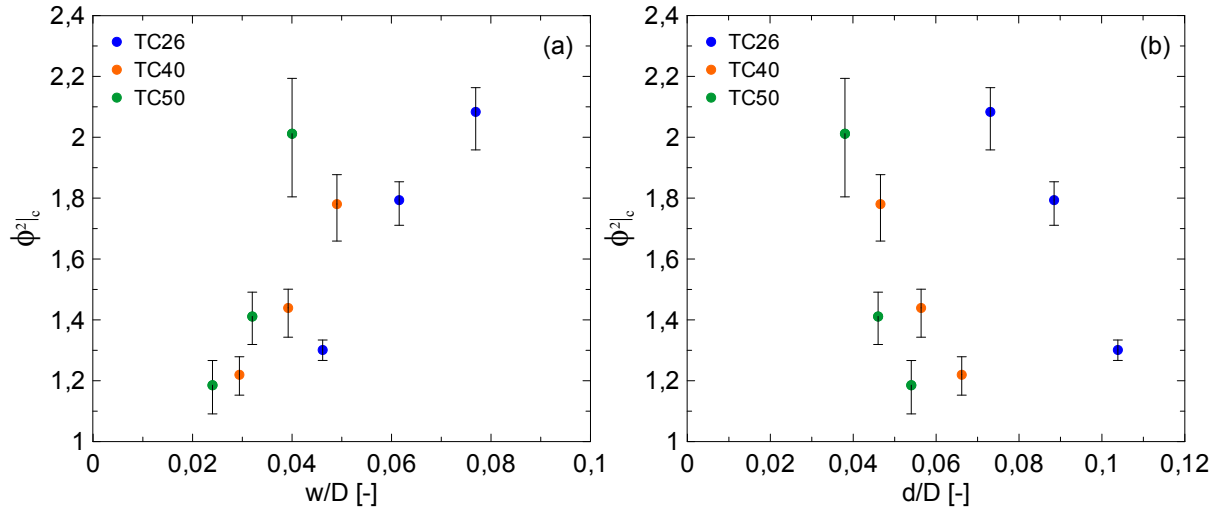
⁹ Fenômeno também observado por Naidek *et al.* (2017).

Figura 31 – PDF dos fatores multiplicadores devido à inserção das cavidades. (a) TCD-1,2, (b) TCD-1,6, (c) TCD-2,0 e (d) Todas as configurações de TC.



A Figura 32 apresenta o comportamento do fator multiplicador corrugado experimental médio em função de w/D e d/D . Observa-se que $\phi^2|_c$ tende a aumentar com o aumento de w/D e a diminuir com o aumento de d/D , comportamento semelhante para os diferentes diâmetros de tubulação corrugada. A partir da regressão dos dados experimentais do fator multiplicador corrugado em função de w/D e d/D , foi proposta uma correlação, Equação 4.2, com o coeficiente de determinação $R^2 = 0,914$. A função logarítmica foi escolhida para correlacionar a razão w/D pelo bom comportamento apresentado por essa função em correlações disponíveis na literatura para escoamento em tubulação corrugada (STEL *et al.*, 2012; NAIDEK *et al.*, 2017).

Figura 32 – Fator multiplicador corrugado. (a) em função de w/D e (b) em função de d/D .



$$\phi^2|_c = 0,96 \ln\left(\frac{w}{D}\right) + 3,14 \left(\frac{d}{D}\right)^{-0,14} \quad (4.2)$$

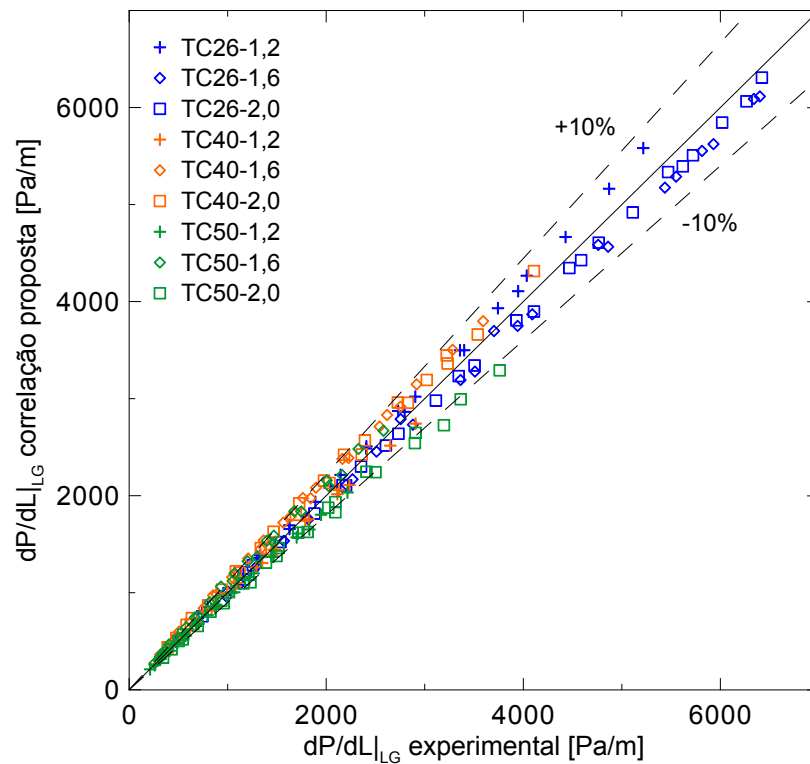
Sendo assim, o gradiente de pressão bifásico para tubulações corrugadas com diferentes larguras de cavidade e diferentes diâmetros é calculado a partir da Equação 4.3.

$$\left.\frac{dP}{dL}\right|_{LG} = 0,96 \ln\left(\frac{w}{D}\right) + 3,14 \left(\frac{d}{D}\right)^{-0,14} \left[1 + \frac{1,6 Re_L^{0,31} Re_G^{-0,07}}{X} + \frac{1}{X^2} \right] \left.\frac{dP}{dL}\right|_{SL} \quad (4.3)$$

onde 1,6, 0,31 e -0,07 são as mesmas constantes utilizadas por Naidek *et al.* (2017), as quais foram mantidas devido à satisfatória concordância com os dados experimentais do presente estudo.

A Figura 33 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais do gradiente de pressão bifásico em tubulações corrugadas com as previsões obtidas a partir da correlação proposta pelo presente estudo, Equações 4.2 e 4.3, onde observa-se um desvio percentual absoluto médio de 10%. Dos 234 pontos experimentais utilizados nessa comparação, 16% dos pontos obtiveram um desvio percentual maior que a média, com valor de desvio percentual máximo de 18%, os quais foram observados para as maiores larguras de cavidade nos maiores diâmetros internos de tubulação. Isso se justifica devido à maior variação do fator multiplicador corrugado, representada pelas barras de erro da Figura 32 para essas configurações de tubulação.

Figura 33 – Comparação dos dados experimentais com a correlação proposta nesse estudo.



A correlação proposta para o fator multiplicador corrugado neste estudo, Equação 4.2, é válida para um escoamento bifásico horizontal ar-água, no padrão golfadas, em tubulações corrugadas com larguras de cavidade de 1,2, 1,6 e 2,0 mm e diâmetros internos de 26, 40,8 e 50 mm. Contudo, essa correlação precisa ser avaliada para diferentes configurações de largura de cavidade, maiores diâmetros internos de tubulação e em escoamentos com fluidos viscosos.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi desenvolvida uma análise experimental do gradiente de pressão bifásico de um escoamento horizontal ar-água no padrão gol-fadas, à pressão e temperatura ambiente, em tubos corrugados de diferentes diâmetros internos ($D=26, 40,8$ e 50 mm). As tubulações corrugadas foram fabricadas a partir de tubos de acrílico, que tiveram suas paredes internas usinadas para obtenção de cavidades do “tipo d”, helicoidalmente distribuídas. Para cada diâmetro interno de tubulação, foram usinadas três diferentes larguras de cavidade ($w=1,2, 1,6$ e $2,0$ mm). O processo de usinagem dos tubos corrugados, foi realizado a partir de um valor constante para o passo entre cavidades ($p=3,9$ mm), o que proporcionou uma variação da distância não usinada entre as cavidades (d), conforme alteração da largura da cavidade (w).

As influências que as diferentes características geométricas das tubulações corrugadas (razões w/D e d/D) proporcionam ao gradiente de pressão foram investigadas no presente estudo, a partir de testes experimentais monofásicos (água) e bifásicos (ar-água). Para garantir a confiabilidade dos testes obtidos a partir da bancada experimental construída, foram realizados testes em tubulações lisas e os resultados foram comparados com as correlações disponíveis na literatura.

Para ambos os testes experimentais, monofásico e bifásico em tubulações corrugadas, observou-se que as características geométricas das cavidades (w/D e d/D) possuem influência sobre o gradiente de pressão.

No escoamento monofásico, observou-se que o gradiente de pressão aumenta com o aumento da largura da cavidade para os diferentes diâmetros interno de tubulação corrugada. Com relação ao fator de atrito monofásico, observou-se que, para as tubulações corrugadas com menor largura de cavidade ($1,2$ mm), a tendência da curva do fator de atrito em relação ao número de Reynolds coincide com a observada para a tubulação lisa. Já para as maiores larguras de cavidade, o fator de atrito apresenta um comportamento característico de fator de atrito em escoamento “completamente rugoso”.

A análise do gradiente de pressão bifásico nas diferentes configurações geométricas de tubulação corrugada, realizada a partir de 234 testes experimentais, mostrou que o gradiente de pressão bifásico aumenta com o aumento da largura da cavidade. O fator multiplicador experimental total do gradiente de pressão bifásico em função do parâmetro de Lockhart-Martinelli (X), também foi afetado pelas características geométricas das cavidades da tubulação corrugada e apresenta a mesma tendência de comportamento observada para

a tubulação lisa.

O fator multiplicador experimental total, foi analisado em função do fator multiplicador corrugado, Equação 4.1, e uma nova correlação que leva em consideração as variações geométricas da cavidade da tubulação corrugada (w/D e d/D) foi proposta a partir de regressão dos dados experimentais, Equação 4.2.

Uma comparação entre os resultados experimentais para o gradiente de pressão bifásico em tubulações corrugadas com a predição obtida a partir da correlação proposta no presente estudo apresenta uma concordância satisfatória com desvios percentuais absolutos médios de 10%.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da análise dos resultados obtidos neste estudo alguns estudos futuros são sugeridos:

- Avaliar mais detalhadamente a influência das características geométricas da tubulação corrugada, razões d/D e w/D , no fator de atrito de um escoamento monofásico.
- Avaliar o desempenho da correlação proposta para o fator multiplicador corrugado em tubulações corrugadas com diferentes características geométricas (maiores larguras de cavidade e maiores diâmetros internos de tubulação).
- Avaliar a influência que as cavidades do “tipo d” dos tubos corrugados de diferentes diâmetros internos de tubulação proporcionam aos parâmetros de caracterização do padrão golfadas (comprimento do pistão de líquido, comprimento da bolha alongada, altura de líquido e frequência de passagem da célula unitária).
- Avaliar numericamente a influência das geometrias das cavidades de diferentes diâmetros internos de tubulações corrugadas em um escoamento bifásico horizontal no padrão golfadas.
- Avaliar o escoamento de fluidos viscosos e o escoamento com partículas em tubuações corrugadas com diferentes configurações geométricas.

Referências

- ADIBI, P.; ANSARI, M. R.; JAFARI, S.; HABIBPOUR, B.; SALIMI, E. Slug initiation evaluation in long horizontal channel experimentally. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, v. 8, n. 65-70, 2014.
- AL-KAYIEM, H. H.; MOHMMED, A. O.; AL-HASHIMY, Z. I.; TIME, R. W. Statistical assessment of experimental observation on the slug body length and slug translational velocity in a horizontal pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 105, p. 252–260, 2017.
- AZEVEDO, H. S. *Simulação numérica e experimental do escoamento turbulento em tubos corrugados*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2010.
- BARNEA, D.; SHOHAM, O.; TAITEL, Y. Flow pattern transition for gas-liquid flow in horizontal and inclined pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, v. 6, p. 217–225, 1980.
- BILEN, K.; CETIN, M.; GUL, H.; BALTA, T. The investigation of groove geometry effect on heat transfer for internally grooved tubes. *Applied Thermal Engineering*, v. 29, p. 753–761, 2009.
- CHANG, K.; CONSTANTINEUSCU, G.; PARK, S. Analysis of the flow and mass transfer processes for the incompressible flow past an open cavity with a laminar and fully turbulent incoming boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 561, n. 4, p. 113–145, 2006.
- CHEN, J. J. J.; LEUNG yiu C.; KO norman W. M. Drag reduction in a longitudinally grooved flow channel. *Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 25, p. 741–745, 1986.
- CHISHOLM, D. A theoretical basis for the Lockhart-Martinelli correlation for two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Transf.*, v. 10, p. 1767–1778, 1967.
- CONTE, M. G.; HEGDE, G. A.; SILVA, M. J. da; SUM, A. K.; MORALES, R. E. M. Characterizaion of slug initiation for horizontal air-water two-phase flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 87, p. 80–92, 2017.
- DALKILIÇ, A. S.; ÇEBİ, A.; ACIKGOZ, O.; WONGWISES, S. Prediction of frictional pressure drop of r134a during condensation inside smooth and corrugated tubes. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 88, p. 183–193, 2017.
- DJENIDI, L.; ANSELMET, F.; ANTONIA, R. A. LDA measurements in a turbulent boundary layer over a d-type rough wall. *Experiments in a Fluids*, v. 16, p. 323 – 329, 1994.
- DONG, Y.; HUIXIONG, L.; TINGKUAN, C. Pressure drop, heat transfer and performance of single-phase turbulent flow in spirally corrugated tubes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 24, p. 131–138, 2001.

- ELAVARASAN, R.; Y, C. C.; ANTONIA, R. Turbulent boundary layer over a smooth wall with widely separated transverse square cavities. *Applied Scientific Research*, v. 55, p. 227–243, 1996.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introdução a Mecânica dos Fluidos*. 7 edição. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2010.
- FRIEDEL, L. Improved friction pressure drop correlation for horizontal and vertical two-phase pipe flow. *European Two-Phase Flow Group Meeting*, p. 485–492, 1979.
- HAMAD, F.; FARAJI, F.; SANTIM, C.; BASHA, N.; ALI, Z. Investigation of pressure drop in horizontal pipes with different diameters. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 91, p. 120–129, 2017.
- HARLEB, A.; FRANZ, E.; BREUER, M. Experimental investigation of heat transfer and friction characteristic of fully developed gas flow in single-start and three-start corrugated tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 103, n. 538-547, 2016.
- HOLMAN, J. *Experimental Method for Engineers*. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- INMETRO/CICMA/SEPIN. *Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008*. 1ª edição brasileira da 1ª edição do bipm de 2008. ed. Rio de Janeiro, 2012.
- JIMÉNEZ, J. Turbulent flow over rough walls. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 36, p. 173 – 196, 2004.
- KANDLIKAR, S. G.; GRANDE, W. J. Evolution of microchannel flow passages - thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat Transfer Engineering*, v. 24, p. 3–17, 2003.
- KONG, R.; KIM, S.; BAJOREK, S.; TIEN, K.; HOXIE, C. Effects of pipe size on horizontal two-phase flow: Flow regimes, pressure drop, two-phase flow parameters, and drift-flux analysis. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 96, p. 75–89, 2018.
- LAOHALERTDECHA, S.; WONGWISES, S. Condensation heat transfer and flow characteristics of r-134a flowing through corrugated tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 54, p. 2673–2682, 2011.
- LEE, H. J.; LEE, S. Y. Pressure drop correlations for two-phase flow with horizontal rectangular channels with small heights. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 27, p. 783–796, 2001.
- LEE, J.; MUDAWAR, I. Two-phase flow in high-heat-flux micro-channel heat sink for refrigeration cooling applications: Part i - pressure drop characteristics. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 48, p. 928–940, 2005.

- LI, Y.; JIN, S. W. T. Experimental investigation on pressure drop and friction factor of slush nitrogen turbulent flow in helically corrugated pipes. *Cryogenics*, v. 94, p. 56–61, 2019.
- LOCKHART, R. W.; MARTINELLI, R. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes. *Chen. Eng. Prog.*, v. 45, p. 39–48, 1949.
- LU, C.; KONG, R.; QIAO, S.; LARIMER, J.; KIM, S.; BAJOREK stephen; TIEN, K.; HOXIE, C. Frictional pressure drop analysis for horizontal and vertical air-water two-phase flows in different pipe sizes. *Nuclear Engineering and Design*, v. 332, p. 147–161, 2018.
- MALTA, E. R. *Investigação do comportamento estrutural de tubos Flexíveis sob cargas compressivas*. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.
- MISHIMA, K.; HIBIKI, T. 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, 1996.
- MORAIS, J. M. *Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore*. Brasília: Ipea: Petrobras, 2013.
- MULLER-STEINHAGEN, H.; HECK, K. A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.*, v. 20, p. 297–308, 1986.
- NAIDEK, B. P.; KASHIWAKURA, L. Y.; ALVES, R. F.; BASSANI, C. L.; STEL, H.; MORALES, R. E. M. Experimental analysis of horizontal liquid-gas slug flow pressure drop in d-type corrugated pipes. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 81, p. 234–243, 2017.
- NIKURADSE, J. *Laws of Flow in Rough Pipes*. [S.l.], 1933.
- NYDAL, O.; PINTUS, S.; ANDREUSSI, P. Statistical characterizaion of slug flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, v. 18, n. 3, p. 439–453, 1992.
- PERRY, A. E.; SCHOFIELD, W. H.; JOUBERT, P. N. Rough wall turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 37, p. 383–413, 1969.
- PETROBRAS. *Conheça curiosidades sobre os equipamentos de nossos sistemas submarinos*. 2015. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>>.
- QUAN, X.; CHENG, P.; WU, H. An experimental investigation on pressure drop of steam condensing in silicon microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 51, p. 5454–5458, 2008.
- RUDER, Z.; HANRATTY, T. J. A definition of gas-liquid plug flow in horizontal pipes. *Int. J. Multiphase Flow*, v. 16, n. 2, p. 233–242, 1990.

SHANNAK, B.; DAMSEH, R.; AL-ODAT, M.; AL-SHANNAK, M.; AZZI, A. Two-phase flow through corrugated u-tube. *J. Mech. Eng. Sci.*, v. 224, p. 2408–2417, 2010.

SHANNAK, B. A. Frictional pressure drop of gas liquid two-phase flow in pipes. *Nuclear Engineering and Design*, v. 238, p. 3277–3284, 2008.

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

STEL, H.; FRANCO, A.; JUQUEIRA, S.; ERTHAL, R. H.; MENDES, R.; GONÇALVES, M. A. L.; MORALES, R. E. M. Turbulent flow in d-type corrugated pipes: flow pattern and friction factor. *Journal of Fluids Engineering*, v. 134, p. 121202–121209, 2012.

SUN, L.; MISHIMA, K. Evaluation analysis of prediction methods for two-phase flow pressure drop in mini-channels. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 35, p. 47–54, 2009.

SUN, M.; ZENG, M. Investigation on turbulent flow and heat transfer characteristics and technical economy of corrugated tube. *Applied Thermal Engineering*, v. 129, p. 1–11, 2018.

SUTARDI; CHING, C. The response of a turbulent boundary layer to different shaped transverse grooves. *Experiments in Fluids*, v. 35, p. 325–337, 2003.

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

VAZE, M. J.; BANERJEE, J. A modified Chisholm's interaction factor for air-water two-phase flow through a horizontal pipe. *Multiphase science and Technology*, v. 25, p. 57–78, 2013.

VICENCIO, F. E. C.; SCHNEIDER, F. A.; COZIN, C.; BARBUTO, F. A.; SILVA, M. J. D.; MORALES, R. E. M. An experimental characterization of horizontal gas-liquid slug flow. *International Engineering Congress and Exposition*, p. 7, 2015. ASME, Houston, USA.

XU, Y.; FANG, X.; SU, X.; ZHOU, Z.; CHEN, W. Evaluation of frictional pressure drop correlations for two-phase flow in pipes. *Nucl. Eng. Des.*, v. 253, p. 86–97, 2012.

APÊNDICE A – USINAGEM DOS TUBOS CORRUGADOS

Tubos de acrílico fabricados pelo processo de centrifugação, também conhecidos como tubos *Cast*, foram os tubos utilizados neste trabalho para o processo de usinagem devido às suas melhores características de resistência mecânica, usinabilidade e menor faixa de tolerância dimensional para a espessura de parede.

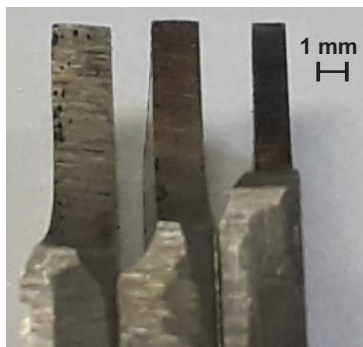
Os tubos corrugados foram fabricados nas instalações do NUEM com auxílio de um aparato de usinagem de tubos, Figura 34. O aparato é composto por quatro suportes para fixação do tubo de acrílico, onde cada diâmetro de tubo possui o seu respectivo suporte. Esses suportes garantem que o tubo fique estático durante todo o processo de usinagem. Um fuso que possui uma manivela acoplada em uma de suas extremidades, um suporte para fixação das ferramentas de corte na outra extremidade e uma castanha que guia o deslocamento linear do fuso percorrem o tubo a ser corrugado.

Figura 34 – Aparato de usinagem utilizado para fabricação dos tubos corrugados.



Três ferramentas de corte com perfil aproximadamente quadrado e com largura igual à largura das cavidades desejadas para os tubos corrugados, Figura 35, foram fabricadas a partir de um bedame de aço rápido com 10% de colbato.

Figura 35 – Ferramentas de aço rápido com 10% de colbato, larguras de 1,2, 1,6 e 2 mm, utilizadas no processo de usinagem dos tubos corrugados.

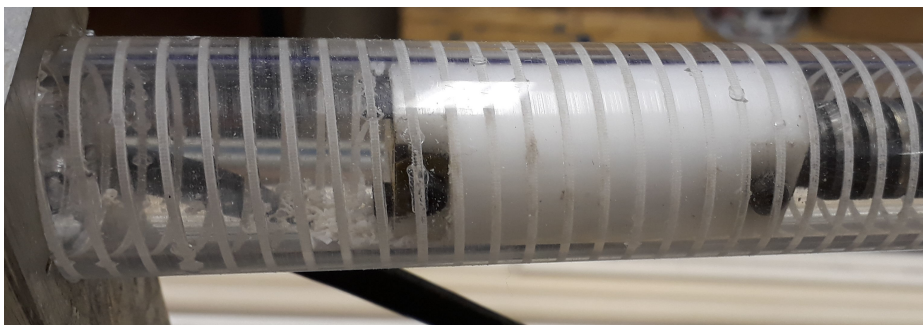


As ferramentas são fixadas por parafusos em um suporte fabricado em poliacetal, cujas dimensões são correspondentes ao diâmetro interno dos tubos de acrílico utilizados neste estudo.

Figura 36 – Suportes fabricados em poliacetal utilizados para fixação das ferramentas de cortes.



A ferramenta é inserida dentro do tubo ao girar a manivela que acopla o fuso. Ao entrar no tubo, a ferramenta usina o mesmo com uma cavidade helicoidal definida geometricamente pelo passo de 3,9 mm do fuso e pelas dimensões da ferramenta de corte, Figura 37. A profundidade da cavidade usinada é definida pelo avanço da ferramenta sobre o material, que é ajustado com auxílio de um parafuso e por medição manual com auxílio de um paquímetro. Cada tubo corrugado fabricado possui 80 cm de comprimento, comprimento limitado pelo tamanho do fuso e por dificuldades no processo de fabricação. Os tubos são usinados em diversos passes de retirada de material, aproximadamente 0,1 mm por passe, e com uma rotação lenta da manivela até atingir uma profundidade de cavidade de aproximadamente 1 mm. Cada passe tem uma pequena remoção de material para evitar uma retirada abrupta do mesmo, que pode provocar fusão dos cavacos de acrílico nas cavidades devido à baixa temperatura de serviço recomendada para o acrílico, que é de aproximadamente 80°C, e também para evitar imperfeições nas laterais das cavidades usinadas.

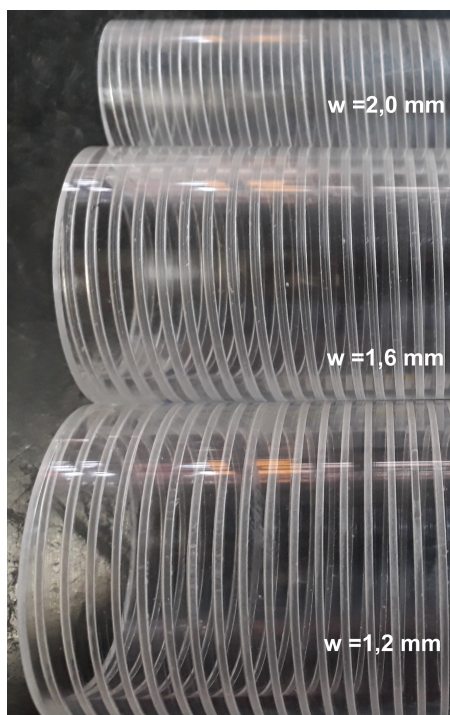
Figura 37 – Processo de fabricação dos tubos corrugados.

Vaselina foi utilizada como lubrificante para facilitar a usinagem dos tubos. Durante todo o processo de retirada de material, ar comprimido era inserido de forma constante no interior do tubo para evitar que cavacos ficassem incrustados na ponta da ferramenta de corte. Ao término de cada passe de remoção de material, todos os cavacos de acrílico eram removidos de dentro do tubo com auxílio de uma escova circular de cerdas macias, com diâmetro próximo ao diâmetro do tubo usinado. Após a finalização do processo de usinagem, o tubo corrugado era devidamente limpo com detergente e água para remoção da vaselina e dos cavacos de acrílico remanescentes. A Figura 38 apresenta um tubo corrugado após o processo de usinagem das cavidades. Ao total, neste trabalho, foram fabricados 36 metros (45 seções de 80 cm) de tubos corrugados.

Figura 38 – Tubo corrugado após o processo de usinagem.

A Figura 39 apresenta o resultado final com as diferentes características geométricas dos tubos corrugados usinados neste trabalho. O tubo de menor diâmetro interno (26 mm), localizado na parte superior da Figura 39, possui uma largura de cavidade de 2 mm, o tubo com 40,8 mm de diâmetro interno possui $w=1,6$ mm e por fim o tubo corrugado de maior diâmetro interno (50 mm) apresenta a menor largura de cavidade de 1,6 mm.

Figura 39 – Diferentes características geométricas dos tubos corrugados usinados neste trabalho.



Para realizar uma verificação do formato das cavidades usinadas nos tubos, uma mistura feita de silicone branco e limalha de ferro foi pressionada no interior da tubulação para obter uma reprodução (molde) das cavidades usinadas. A limalha de ferro foi adicionada ao silicone apenas para proporcionar magnetismo ao molde, para facilitar a visualização das cavidades, uma vez que o molde fica posicionado de forma reta sobre um imã. A Figura 40 apresenta o molde do formato geométrico das cavidades de largura 1,2 mm usinadas, onde é possível perceber que o formato da cavidade é aproximadamente quadrado como desejado neste trabalho.

Figura 40 – Reprodução (molde) do formato das cavidades usinadas nos tubos corrugados para verificação da forma geométrica da cavidade.



A.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS DURANTE O PROCESSO DE USINAGEM DOS TUBOS CORRUGADOS

Alguns problemas que ocorreram durante o processo de usinagem dos tubos corrugados são abordados nesta seção. Inicialmente, sem conhecimento prévio das exigências necessárias para a usinagem interna de tubos de acrílico, tubos de acrílico fabricados pelo processo de extrusão foram escolhidos para a execução do processo de usinagem dos tubos corrugados. A Figura 41 apresenta o processo de usinagem de um tubo extrudado, onde é possível observar uma não uniformidade no processo de remoção de material, trechos que apresentam o início da usinagem das cavidades e extensões sem nenhuma remoção de material (Figura 42), problema que ocorre devido à grande variação do diâmetro interno dos tubos de acrílico extrudados. Outro defeito observado na usinagem dos tubos extrudados foram as imperfeições geradas nas bordas das cavidades usinadas, como pode ser observado na Figura 43, problema que ocorria mesmo com a remoção lenta de material. Tentativas de usinagem interna com tubos extrudados de quatro fornecedores diferentes foram realizadas e em todas as tentativas foram observados os problemas de usinagem descritos anteriormente. Devido às adversidades encontradas na usinagem com os tubos extrudados, foram realizadas tentativas de usinagem com os tubos de acrílico fabricados pelo processo de centrifugação, as quais se mostraram menos dificultosas e sem a predominância dos problemas encontrados com os tubos extrudados.

Figura 41 – Processo de usinagem de um tubo de acrílico extrudado com não uniformidade devido à grande variação de espessura de parede.



Figura 42 – Processo de usinagem em tubo de acrílico extrudado com extensões sem remoção de material.

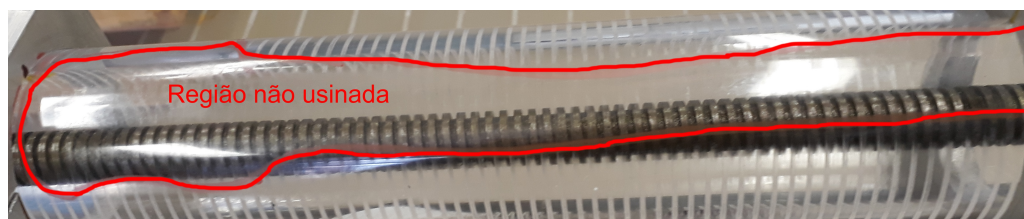
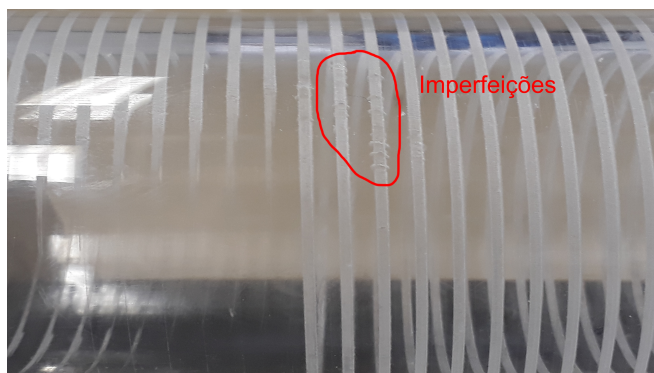


Figura 43 – Imperfeições nas bordas das cavidades usinadas.



Os problemas de usinagem relatados nas tentativas de usinagem utilizando os tubos de acrílico extrudados foram solucionados utilizando os tubos centrifugados, isso devido às melhores características de usinabilidade desses tubos. Também contribuíram para a solução da problemática, alguns aprimoramentos do processo de usinagem. Como por exemplo, adaptação da velocidade de usinagem que era feita de acordo com cada seção de tubo a ser usinado, lubrificação da ferramenta de corte e da parede interna da tubulação, retirada de cavacos com a inserção contínua de ar comprimido durante todo o processo de usinagem e adequação do suporte da ferramenta de corte. Alguns ângulos para saída de cavaco para evitar acúmulo e incrustação de cavaco na ponta ferramenta de corte, Figura 44.

Figura 44 – Cavaco encrustado na ponta da ferramenta de corte.



APÊNDICE B – INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Ao apresentar um resultado de medição de uma grandeza (y) é importante indicar quantitativamente a qualidade desse resultado para proporcionar uma forma de avaliação da confiabilidade do mesmo. Essa indicação quantitativa de qualidade é conhecida como incerteza de medição ($u_c(y)$), Equação B.1 (INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012).

$$y = \bar{y} \pm u_c(y) \quad (\text{B.1})$$

A incerteza de medição é definida como um parâmetro que representa a dispersão dos valores do mensurando e pode ser dividida em duas categorias: tipo A e tipo B. A incerteza do tipo A ($s(y)$) está associada com a variação do mensurando durante a medição, já a incerteza do tipo B ($b(y)$) avalia a incerteza relacionada com os instrumentos utilizados para a medição.

Neste estudo, foi utilizado o desvio-padrão experimental ($s(y)$) o qual é caracterizado como um componente de incerteza do tipo A e pode ser calculado a partir da Equação B.2. A incerteza do tipo B ($b(y)$) foi obtida a partir de dados do fabricante dos equipamentos utilizados.

$$s(y) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2}{n - 1}} \quad (\text{B.2})$$

onde j representa uma medição e $\bar{y}$ a média das medições.

Os valores de incerteza são apresentados a partir da combinação dos dois tipos de incerteza ($u_c(y)$), Equação B.3, e na forma de incerteza expandida ($U_k(y)$) a qual é obtida a partir da multiplicação da incerteza combinada por um fator de abrangência (k), Equação B.4.

Para este estudo, foi adotado um nível de confiabilidade de 95% para os resultados, o que por consequência, define um fator de abrangência com valor de 1,96.

$$u_c(y) = \sqrt{s(y)^2 + b(y)^2} \quad (\text{B.3})$$

$$U_k(y) = k u_c(y) \quad (\text{B.4})$$

onde K é o fator de abrangência.

Os valores de incerteza para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico ar-água no padrão golfadas nas diferentes configurações de tubulação corrugada são apresentadas nas Tabelas 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 e 17.

Tabela 9 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC26-1,2).

TC26-1,2					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	740,7	20,9	4,0	21,3	41,8
P02	1626,2	24,3	4,0	24,7	48,3
P03	2730,5	34,5	4,0	34,8	68,1
P04	4035,0	50,1	4,0	50,2	98,4
P05	473,2	35,3	4,0	35,5	69,6
P06	1300,7	27,1	4,0	27,4	53,7
P07	2408,0	32,8	4,0	33,0	64,7
P08	3743,0	45,2	4,0	45,4	89,0
P09	5217,9	54,6	4,0	54,7	107,2
P10	956,4	36,7	4,0	36,9	72,3
P11	2041,8	37,4	4,0	37,6	73,7
P12	3357,7	41,5	4,0	41,7	81,8
P13	4871,1	54,5	4,0	54,7	107,1
P14	1627,6	48,8	4,0	48,9	95,9
P15	2904,2	42,8	4,0	42,9	84,2
P16	4429,2	54,6	4,0	54,7	107,2
P17	1159,7	56,2	4,0	56,3	110,4
P18	2405,5	53,5	4,0	53,7	105,2
P19	3948,1	52,0	4,0	52,2	102,3
P20	699,5	103,5	4,0	103,6	203,0
P21	1890,1	59,1	4,0	59,3	116,2
P22	3400,3	64,3	4,0	64,4	126,2
P23	1331,0	91,5	4,0	91,6	179,6
P24	2796,0	75,8	4,0	75,9	148,8
P25	796,2	125,0	4,0	125,0	245,1
P26	2145,9	79,1	4,0	79,2	155,2

Tabela 10 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC26-1,6).

TC26-1,6					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	1000,8	19,8	4,0	20,2	39,6
P02	2266,9	11,6	4,0	12,3	24,0
P03	3942,8	15,1	4,0	15,6	30,6
P04	5813,9	11,7	4,0	12,3	24,2
P05	660,8	48,6	4,0	48,7	95,5
P06	1817,9	28,3	4,0	28,6	56,1
P07	3509,5	19,7	4,0	20,1	39,4
P08	5437,2	18,5	4,0	19,0	37,2
P09	6340,6	20,3	4,0	20,7	40,6
P10	1294,9	54,8	4,0	54,9	107,7
P11	2880,1	32,1	4,0	32,4	63,4
P12	4861,0	23,1	4,0	23,5	46,0
P13	5930,1	19,7	4,0	20,1	39,4
P14	2203,3	45,4	4,0	45,6	89,3
P15	4091,3	46,1	4,0	46,3	90,7
P16	6401,2	42,2	4,0	42,4	83,0
P17	1570,5	63,6	4,0	63,7	124,9
P18	3363,3	57,6	4,0	57,8	113,2
P19	5550,9	43,8	4,0	44,0	86,3
P20	989,5	132,6	4,0	132,7	260,0
P21	2510,7	75,4	4,0	75,5	148,0
P22	4760,7	51,6	4,0	51,7	101,4
P23	1808,1	86,8	4,0	86,9	170,3
P24	3702,9	79,3	4,0	79,4	155,7
P25	1127,2	163,3	4,0	163,4	320,2
P26	2755,3	106,3	4,0	106,3	208,4

Tabela 11 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC26-2,0).

TC26-2,0					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	1183,1	22,8	4,0	23,2	45,4
P02	2733,0	15,0	4,0	15,5	30,4
P03	4587,1	16,5	4,0	17,0	33,3
P04	5722,5	17,4	4,0	17,9	35,0
P05	743,3	32,7	4,0	32,9	64,6
P06	2165,7	30,1	4,0	30,4	59,5
P07	4108,4	19,6	4,0	20,0	39,2
P08	6265,6	19,0	4,0	19,4	38,1
P09	5111,2	18,3	4,0	18,7	36,7
P10	1535,6	42,2	4,0	42,4	83,2
P11	3344,6	23,2	4,0	23,5	46,1
P12	5618,8	33,9	4,0	34,2	66,9
P13	2353,5	44,9	4,0	45,1	88,3
P14	2605,6	49,9	4,0	50,1	98,1
P15	4765,6	41,3	4,0	41,5	81,3
P16	6018,3	36,1	4,0	36,3	71,1
P17	1880,5	107,7	4,0	107,8	211,2
P18	3930,3	56,2	4,0	56,3	110,4
P19	6421,6	37,6	4,0	37,8	74,1
P20	1158,7	152,5	4,0	152,6	299,0
P21	3113,0	69,8	4,0	69,9	137,1
P22	5469,9	60,8	4,0	60,9	119,4
P23	2201,9	141,0	4,0	141,0	276,4
P24	4467,5	77,4	4,0	77,5	151,9
P25	1255,8	229,1	4,0	229,1	449,1
P26	3505,4	114,5	4,0	114,6	224,6

Tabela 12 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC40-1,2).

TC40-1,2					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	388,1	31,4	4,0	31,6	62,0
P02	873,5	28,2	4,0	28,5	55,9
P03	1494,4	42,4	4,0	42,6	83,4
P04	2235,2	62,0	4,0	62,1	121,7
P05	257,5	47,3	4,0	47,5	93,1
P06	695,4	35,5	4,0	35,7	70,0
P07	1350,5	46,3	4,0	46,5	91,0
P08	2113,8	74,2	4,0	74,3	145,6
P09	517,2	49,4	4,0	49,6	97,2
P10	1079,3	47,5	4,0	47,6	93,3
P11	1822,9	70,4	4,0	70,5	138,2
P12	2649,9	95,2	4,0	95,3	186,7
P13	319,2	78,6	4,0	78,7	154,2
P14	836,5	53,5	4,0	53,6	105,1
P15	1481,1	66,8	4,0	66,9	131,1
P16	2907,0	84,9	4,0	85,0	166,5
P17	615,2	77,7	4,0	77,8	152,5
P18	1290,8	81,8	4,0	81,9	160,5
P19	2127,9	113,2	4,0	113,3	222,1
P20	369,9	89,2	4,0	89,3	175,0
P21	998,7	91,8	4,0	91,9	180,0
P22	1787,8	102,3	4,0	102,4	200,6
P23	694,6	100,0	4,0	100,0	196,1
P24	1466,5	111,8	4,0	111,9	219,4
P25	432,5	146,8	4,0	146,9	287,9
P26	1094,5	106,1	4,0	106,2	208,2

Tabela 13 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC40-1,6).

TC40-1,6					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	479,7	19,5	4,0	19,9	39,0
P02	1079,5	11,8	4,0	12,4	24,3
P03	1841,9	8,9	4,0	9,7	19,1
P04	2753,1	9,8	4,0	10,6	20,8
P05	315,4	41,3	4,0	41,5	81,4
P06	885,6	22,0	4,0	22,4	43,9
P07	1640,0	20,6	4,0	21,0	41,2
P08	2541,3	17,9	4,0	18,4	36,0
P09	629,4	36,4	4,0	36,6	71,8
P10	1335,3	22,3	4,0	22,7	44,5
P11	2226,7	19,5	4,0	19,9	39,0
P12	3283,3	18,0	4,0	18,4	36,1
P13	2917,7	42,7	4,0	42,9	84,0
P14	1045,3	30,2	4,0	30,4	59,6
P15	1896,3	34,2	4,0	34,5	67,6
P16	3592,6	12,9	4,0	13,5	26,5
P17	755,6	56,3	4,0	56,5	110,6
P18	1565,3	29,6	4,0	29,9	58,5
P19	2617,4	36,1	4,0	36,4	71,3
P20	465,9	98,8	4,0	98,9	193,8
P21	1207,8	57,3	4,0	57,4	112,6
P22	2164,1	50,7	4,0	50,8	99,6
P23	852,1	107,7	4,0	107,8	211,3
P24	1763,1	60,9	4,0	61,1	119,7
P25	508,7	124,2	4,0	124,3	243,6
P26	1364,5	95,4	4,0	95,4	187,1

Tabela 14 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC40-2,0).

TC40-2,0					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	625,0	18,6	4,0	19,0	37,3
P02	1387,5	20,8	4,0	21,2	41,5
P03	2360,5	19,2	4,0	19,6	38,4
P04	3537,8	18,8	4,0	19,3	37,8
P05	391,4	47,8	4,0	48,0	94,1
P06	1119,8	26,7	4,0	27,0	53,0
P07	2032,7	24,3	4,0	24,6	48,3
P08	3232,3	19,6	4,0	20,1	39,3
P09	801,3	47,8	4,0	47,9	94,0
P10	1691,7	28,4	4,0	28,7	56,2
P11	2828,6	27,7	4,0	28,0	54,9
P12	4108,0	19,3	4,0	19,7	38,6
P13	479,1	94,4	4,0	94,5	185,2
P14	1336,3	48,0	4,0	48,2	94,5
P15	2392,7	45,1	4,0	45,3	88,8
P16	3020,6	33,7	4,0	33,9	66,5
P17	940,6	70,3	4,0	70,4	138,0
P18	1977,3	51,1	4,0	51,3	100,5
P19	3222,8	47,6	4,0	47,7	93,6
P20	583,0	124,8	4,0	124,8	244,7
P21	1466,1	72,1	4,0	72,2	141,5
P22	2726,9	49,3	4,0	49,5	97,0
P23	1083,1	112,9	4,0	112,9	221,4
P24	2180,6	73,1	4,0	73,2	143,4
P25	635,9	170,8	4,0	170,9	334,9
P26	1725,5	103,9	4,0	104,0	203,9

Tabela 15 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC50-1,2).

TC50-1,2					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	317,3	21,8	4,0	22,1	43,4
P02	703,4	44,7	4,0	44,9	88,0
P03	1220,1	78,4	4,0	78,5	153,8
P04	1829,2	120,7	4,0	120,8	236,7
P05	212,5	43,3	4,0	43,5	85,2
P06	571,7	36,3	4,0	36,6	71,7
P07	1066,6	65,8	4,0	65,9	129,1
P08	1699,7	108,7	4,0	108,7	213,1
P09	411,2	39,7	4,0	39,9	78,2
P10	874,3	54,6	4,0	54,8	107,4
P11	1466,4	94,5	4,0	94,5	185,3
P12	2215,5	148,6	4,0	148,6	291,3
P13	259,7	72,7	4,0	72,9	142,8
P14	678,2	55,0	4,0	55,2	108,2
P15	1263,6	78,0	4,0	78,2	153,2
P16	1947,5	123,3	4,0	123,3	241,7
P17	490,6	72,2	4,0	72,3	141,7
P18	1039,0	63,5	4,0	63,6	124,6
P19	1712,9	110,9	4,0	111,0	217,6
P20	296,4	103,3	4,0	103,4	202,6
P21	795,0	72,0	4,0	72,1	141,3
P22	1446,7	90,4	4,0	90,5	177,3
P23	549,4	100,3	4,0	100,3	196,7
P24	1175,9	73,8	4,0	73,9	144,8
P25	337,4	152,1	4,0	152,1	298,2
P26	883,6	105,4	4,0	105,5	206,7

Tabela 16 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC50-1,6).

TC50-1,6					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	397,0	16,3	4,0	16,8	33,0
P02	866,0	13,6	4,0	14,1	27,7
P03	1469,5	9,5	4,0	10,3	20,1
P04	2161,2	11,0	4,0	11,7	22,9
P05	258,9	52,1	4,0	52,2	102,3
P06	701,3	29,6	4,0	29,8	58,5
P07	1298,0	21,0	4,0	21,4	41,9
P08	2026,3	19,1	4,0	19,5	38,2
P09	495,8	45,4	4,0	45,6	89,3
P10	1050,0	27,8	4,0	28,1	55,0
P11	1745,6	27,1	4,0	27,4	53,6
P12	2580,8	17,1	4,0	17,5	34,3
P13	313,8	93,0	4,0	93,1	182,5
P14	816,3	60,6	4,0	60,8	119,1
P15	1468,8	32,2	4,0	32,4	63,6
P16	2327,6	26,8	4,0	27,1	53,1
P17	578,7	79,5	4,0	79,6	156,0
P18	1202,6	47,5	4,0	47,7	93,4
P19	2006,1	46,4	4,0	46,6	91,4
P20	363,3	120,0	4,0	120,0	235,3
P21	931,8	86,1	4,0	86,2	169,0
P22	1676,4	45,7	4,0	45,8	89,8
P23	667,5	111,5	4,0	111,6	218,7
P24	1397,3	58,4	4,0	58,6	114,8
P25	404,3	148,3	4,0	148,3	290,7
P26	1070,7	107,0	4,0	107,1	209,9

Tabela 17 – Incertezas de medição para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC50-2,0).

TC50-2,0					
P	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]	$s(y)$ [Pa/m]	$b(y)$ [Pa/m]	$u_c(y)$ [Pa/m]	$U_{95}(y)$ [Pa/m]
P01	543,6	23,6	4,0	23,9	46,8
P02	1231,2	18,6	4,0	19,1	37,4
P03	2092,9	19,7	4,0	20,1	39,3
P04	3194,5	20,2	4,0	20,6	40,3
P05	344,0	69,2	4,0	69,3	135,9
P06	959,3	27,0	4,0	27,3	53,6
P07	1811,7	17,3	4,0	17,7	34,7
P08	2899,6	23,0	4,0	23,4	45,8
P09	696,4	52,4	4,0	52,5	102,9
P10	1495,3	33,8	4,0	34,0	66,6
P11	2499,9	25,8	4,0	26,1	51,2
P12	3760,9	30,1	4,0	30,3	59,5
P13	430,0	126,2	4,0	126,3	247,5
P14	1158,6	67,2	4,0	67,3	131,9
P15	2093,9	45,5	4,0	45,7	89,6
P16	3364,8	37,4	4,0	37,6	73,7
P17	825,4	116,1	4,0	116,1	227,6
P18	1717,8	61,0	4,0	61,1	119,8
P19	2907,2	39,7	4,0	39,9	78,3
P20	502,9	178,9	4,0	179,0	350,8
P21	1388,8	102,6	4,0	102,7	201,3
P22	2408,6	51,5	4,0	51,7	101,3
P23	935,6	145,2	4,0	145,2	284,6
P24	2020,6	97,9	4,0	98,0	192,0
P25	549,7	219,4	4,0	219,4	430,1
P26	1516,9	140,5	4,0	140,5	275,4

B.1 PROPAGAÇÃO DAS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO

Quando um parâmetro R é função de outros parâmetros $x_1, x_2, \dots, x_n$ a incerteza desse parâmetro $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é obtida a partir da Equação B.5 (HOLMAN, 2012).

$$u_c = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} u_{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} u_{x_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} u_{x_n} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{B.5})$$

onde $\partial R / \partial x_n$ representa a derivada parcial do parâmetro R em relação a variável x_n e u_{x_n} é a incerteza de medição da variável x_n .

A incerteza para o fator de atrito de um escoamento monofásico de água em tubulações lisas de diferentes diâmetros são apresentadas nas Tabe-

las 18, 19 e 20.

Tabela 18 – Incertezas de medição para o fator de atrito do escoamento monofásico em tubulação lisa com diâmetro interno de 26 mm (TL26).

TL26			
Re_L	f_{exp}	$u_c(y)$	$U_{95}(y)$
14934,3	0,02842	0,00078	0,00153
19929,2	0,02633	0,00049	0,00097
24896,5	0,02482	0,00037	0,00073
29883,8	0,02363	0,00029	0,00058
34862,0	0,02273	0,00025	0,00048
39838,9	0,02199	0,00022	0,00043
44829,7	0,02135	0,00020	0,00038
49817,7	0,02080	0,00018	0,00036
54788,9	0,02034	0,00017	0,00033
59776,7	0,01993	0,00016	0,00031
64754,8	0,01955	0,00015	0,00029
69749,9	0,01922	0,00014	0,00028
74726,9	0,01893	0,00014	0,00027
79708,9	0,01866	0,00013	0,00026

Tabela 19 – Incertezas de medição para o fator de atrito do escoamento monofásico em tubulação lisa com diâmetro interno de 40 mm (TL40).

TL40			
Re_L	f_{exp}	$u_c(y)$	$U_{95}(y)$
15024,4	0,02803	0,00221	0,00434
20055,7	0,02580	0,00138	0,00270
24982,3	0,02431	0,00083	0,00163
30000,0	0,02316	0,00061	0,00119
34977,8	0,02224	0,00046	0,00091
39956,8	0,02149	0,00038	0,00074
44952,1	0,02087	0,00031	0,00061
49950,7	0,02033	0,00027	0,00052
54951,3	0,01988	0,00024	0,00046
59949,0	0,01947	0,00021	0,00041
64941,3	0,01912	0,00019	0,00037
69932,5	0,01880	0,00017	0,00034
74934,0	0,01850	0,00016	0,00031
79933,4	0,01823	0,00015	0,00029

Tabela 20 – Incertezas de medição para o fator de atrito do escoamento monofásico em tubulação lisa com diâmetro interno de 50 mm (TL50).

TL50			
Re_L	f_{exp}	$u_c(y)$	$U_{95}(y)$
14982,9	0,02936	0,00418	0,00820
19976,0	0,02685	0,00238	0,00467
24983,1	0,02519	0,00155	0,00305
29960,7	0,02399	0,00110	0,00216
34967,0	0,02301	0,00083	0,00162
39967,8	0,02222	0,00065	0,00128
44956,7	0,02157	0,00053	0,00103
49952,6	0,02101	0,00044	0,00086
54950,7	0,02052	0,00038	0,00074
59942,2	0,02009	0,00032	0,00064
64946,8	0,01972	0,00029	0,00056
69937,2	0,01938	0,00025	0,00050
74929,5	0,01909	0,00023	0,00045
79929,2	0,01880	0,00021	0,00041

A Tabela 21 apresenta as incertezas do diâmetro interno da tubulação de acrílico e do comprimento da seção de teste. A medição do diâmetro interno da tubulação foi feita utilizando um paquímetro com resolução de 0,05 mm e o comprimento da seção de testes foi medido por uma trena, com resolução de 1 mm.

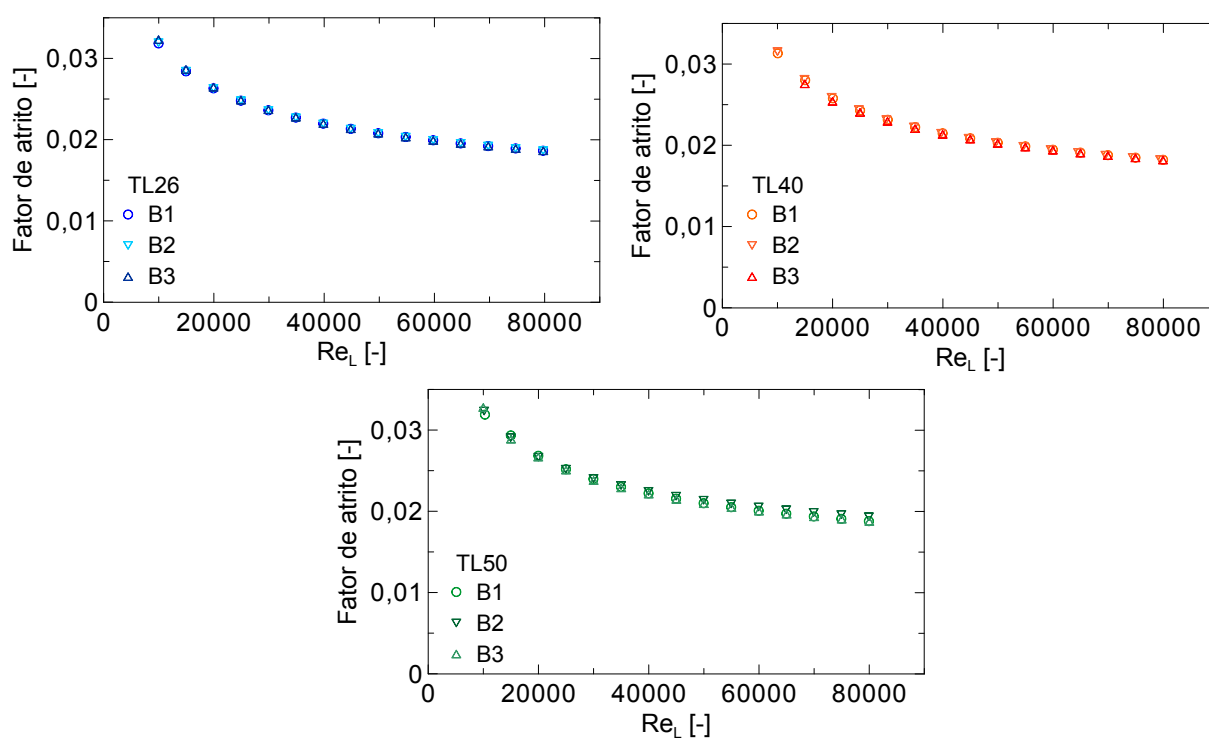
Tabela 21 – Incertezas das medições do diâmetro interno da tubulação e do comprimento da seção de testes.

Parâmetro	$u_c(y)$ [mm]	$U_{95}(y)$
Comprimento da seção de teste (L)	$\pm 0,5$	1
Diâmetro da tubulação (D)	$\pm 0,025$	0,05

APÊNDICE C – REPETITIVIDADE DOS TESTES EXPERIMENTAIS

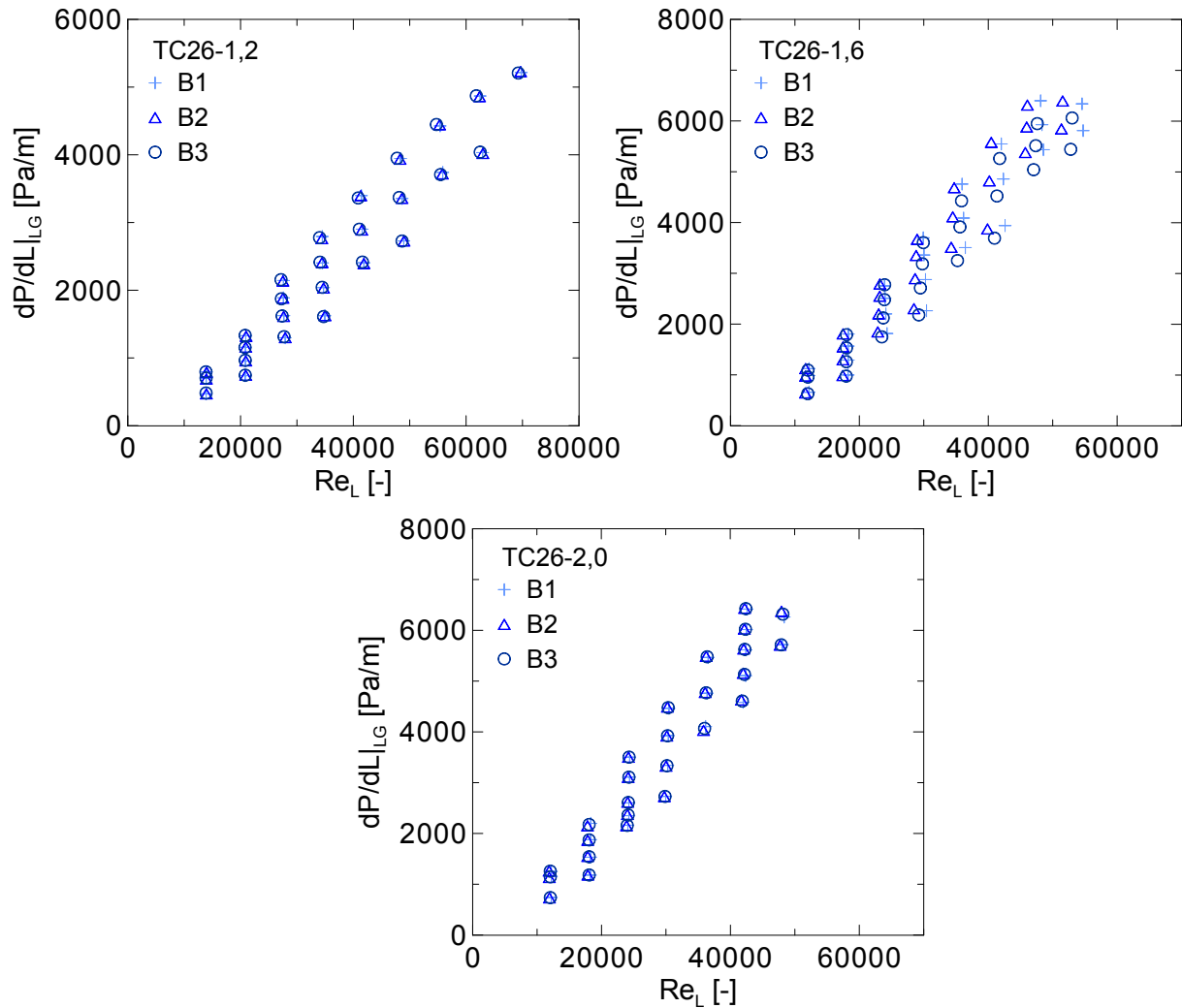
Nesta seção, é apresentada a repetitividade das medidas experimentais do presente estudo. A Figura 45 apresenta os resultados para o fator de atrito de um escoamento monofásico de água em diferentes diâmetros de tubulação lisa. Um desvio percentual absoluto máximo de 3% entre as baterias de resultados (B1, B2 e B3) foi observado para a TL50. As TL26 e TL40 obtiveram um desvio percentual absoluto máximo de 1,5% e 2%, respectivamente.

Figura 45 – Repetitividade do fator de atrito para o escoamento monofásico de água nas diferentes tubulações lisas.



As Figuras 46, 47 e 48 apresentam as medidas experimentais, para as três baterias de testes realizadas, para o gradiente de pressão bifásico nas diferentes configurações de tubulação corrugada.

Figura 46 – Medidas experimentais para o gradiente de pressão bifásico de um escoamento bifásico em tubulação corrugada de diâmetro interno de 26 mm para as três diferentes larguras de cavidade.



Observa-se que para algumas baterias de testes, como por exemplo as baterias da TC26-1,6, o gradiente de pressão é um pouco deslocado na direção do eixo x, este deslocamento ocorre por causa da variação da temperatura da fase líquida, que possui uma incerteza relativa de medição de $\pm 4\%$, a qual proporciona uma alteração do número de Reynolds da fase líquida. Uma comparação entre as baterias para todos os testes experimentais realizados neste trabalho proporcionou uma variação percentual média de 6% entre as medições de gradiente de pressão bifásico.

Figura 47 – Medidas experimentais para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada de diâmetro interno de 40,8 mm para as três diferentes larguras de cavidade.

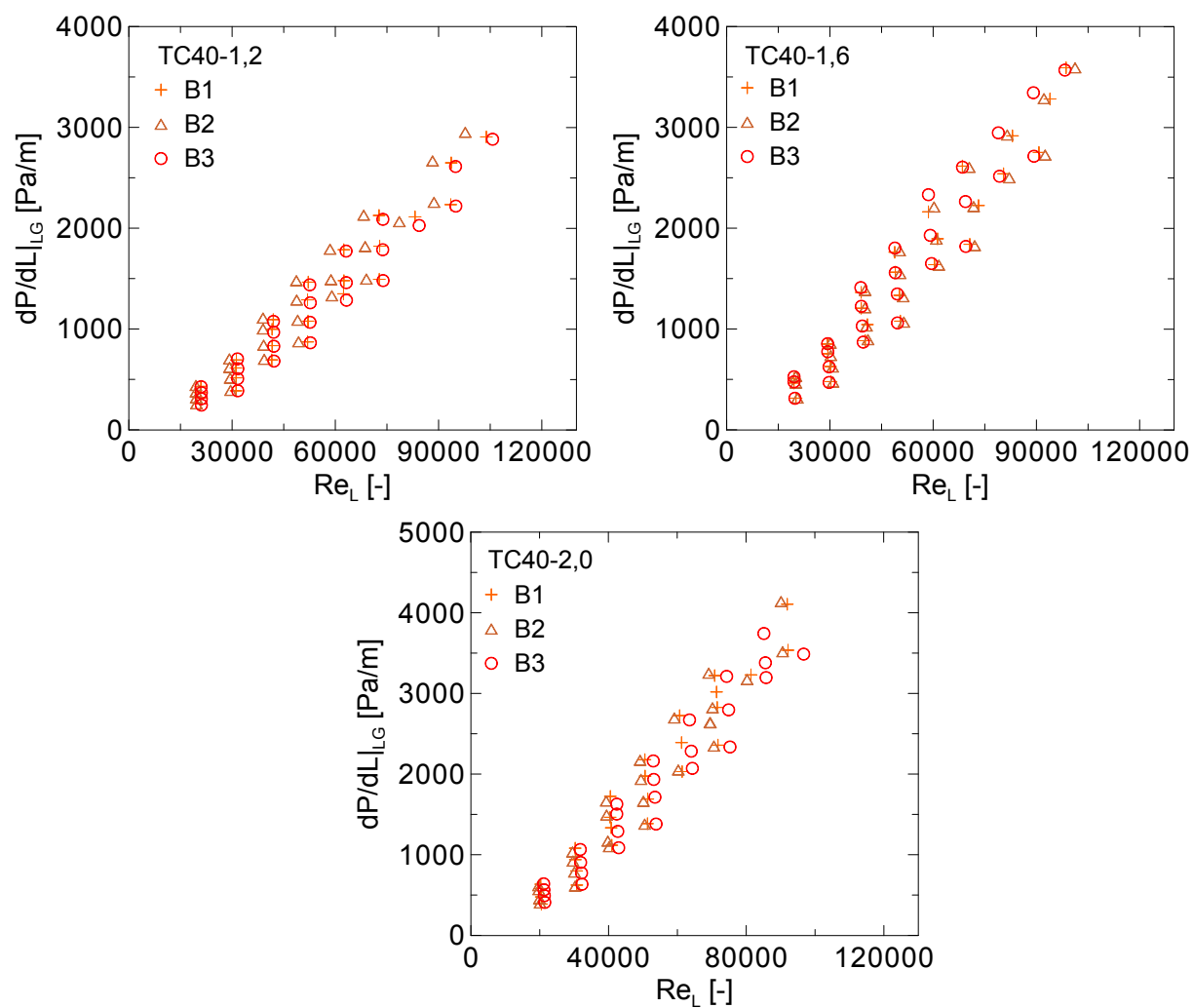
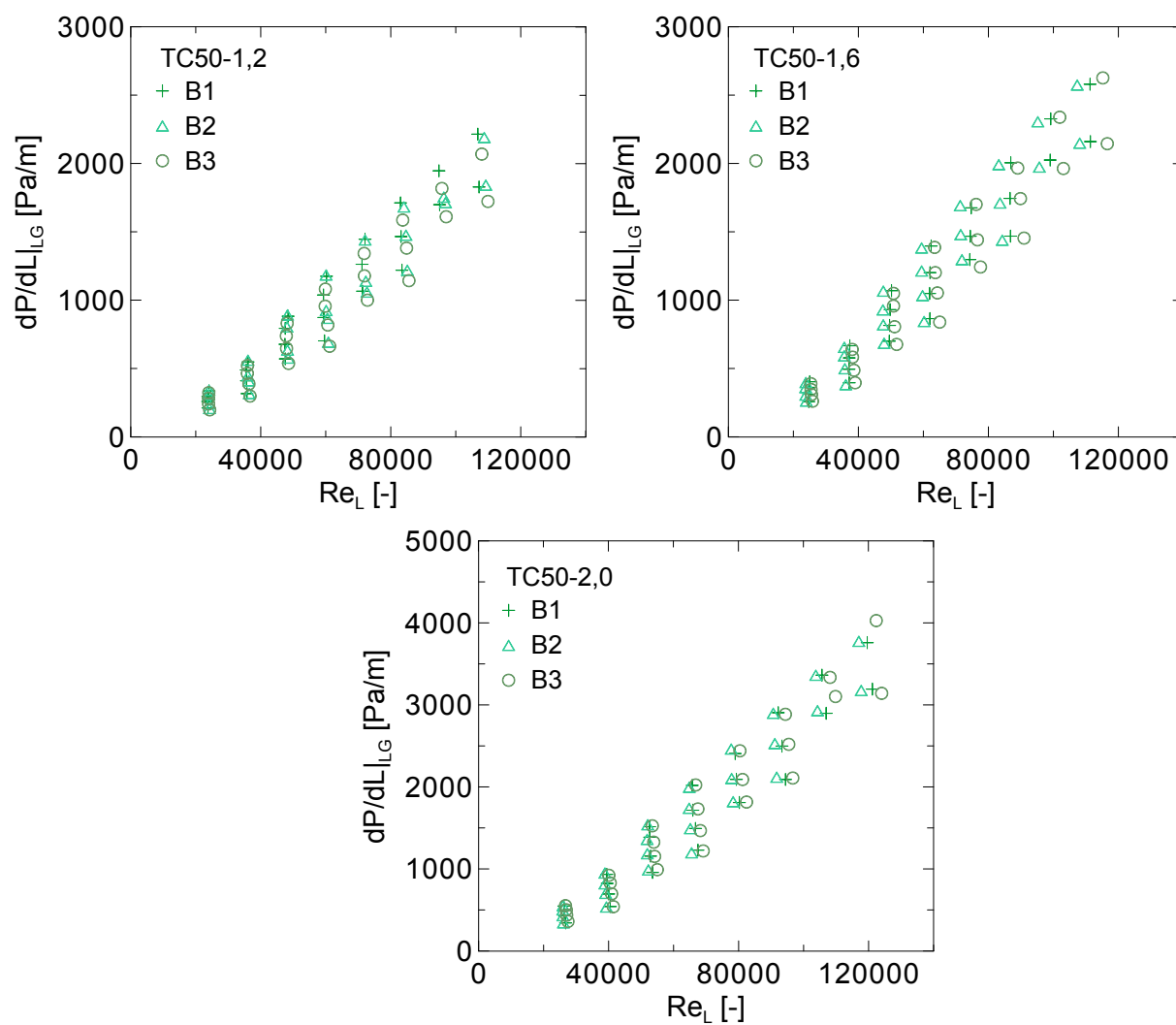


Figura 48 – Medidas experimentais para o gradiente de pressão de um escoamento bifásico em tubulação corrugada de diâmetro interno de 50 mm para as três diferentes larguras de cavidade.



APÊNDICE D – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção, são apresentados os resultados experimentais para o gradiente de pressão do escoamento bifásico ar-água ($dP/dL|_{LG}$), massa específica da fase líquida (ρ_L), temperatura (T_L , T_G), vazões mássicas das fases ($\dot{m}_L$, $\dot{m}_G$) e velocidades superficiais das fases (J_L , J_G) nas diferentes configurações de tubulação corrugada utilizadas neste estudo, Tabela 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29 e 30.

Tabela 22 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC26-1,2).

TC26-1,2								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG} \pm U95(y)$ [Pa/m]
P01	22,9	0,37	995,7	0,75	21,7	0,0005	0,75	740,7 ± 41,8
P02	23,2	0,66	997,0	1,25	21,6	0,0005	0,75	1626,2 ± 48,3
P03	23,2	0,93	996,8	1,75	21,5	0,0006	0,76	2730,5 ± 68,1
P04	23,2	1,19	996,7	2,25	21,5	0,0007	0,75	4035,0 ± 98,4
P05	22,9	0,27	995,7	0,50	21,7	0,0006	0,99	473,2 ± 69,6
P06	23,1	0,53	997,1	1,00	21,5	0,0007	0,99	1300,7 ± 53,7
P07	23,1	0,79	996,9	1,50	21,5	0,0008	1,00	2408,0 ± 64,7
P08	23,1	1,06	996,7	2,00	21,5	0,0009	1,01	3743,0 ± 89,0
P09	23,1	1,32	996,5	2,50	21,4	0,001	1,00	5217,9 ± 107,2
P10	23,0	0,40	995,7	0,75	21,6	0,0008	1,25	956,4 ± 72,3
P11	22,9	0,66	997,0	1,25	21,5	0,0009	1,25	2041,8 ± 73,7
P12	22,9	0,93	996,9	1,75	21,3	0,001	1,25	3357,7 ± 81,8
P13	22,9	1,19	996,7	2,25	21,3	0,0012	1,25	4871,1 ± 107,1
P14	22,7	0,53	997,1	1,00	21,2	0,0011	1,50	1627,6 ± 95,9
P15	22,8	0,80	997,0	1,50	21,2	0,0012	1,51	2904,2 ± 84,2
P16	22,8	1,06	996,8	2,00	21,1	0,0014	1,50	4429,2 ± 107,2
P17	23,0	0,40	995,7	0,75	21,4	0,0012	1,75	1159,7 ± 110,4
P18	22,7	0,66	997,1	1,25	21,0	0,0013	1,75	2405,5 ± 105,4
P19	22,7	0,93	996,9	1,75	21,0	0,0016	1,75	3948,2 ± 102,3
P20	23,0	0,26	995,7	0,50	21,6	0,0013	2,01	699,5 ± 203,0
P21	22,7	0,53	997,1	1,00	20,9	0,0015	2,00	1890,0 ± 116,2
P22	22,7	0,80	997,0	1,50	20,9	0,0017	2,00	3400,3 ± 126,2
P23	23,1	0,40	995,7	0,75	21,5	0,0015	2,25	1331,0 ± 179,6
P24	22,7	0,66	997,0	1,25	20,8	0,0018	2,26	2796,0 ± 148,8
P25	23,1	0,26	995,7	0,50	21,6	0,0016	2,51	796,2 ± 245,1
P26	22,7	0,53	997,1	1,00	20,7	0,0019	2,51	2145,9 ± 155,2

Tabela 23 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC26-1,6).

TC26-1,6								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]
P01	17,4	0,40	997,1	0,75	15,3	0,0005	0,76	1000,8 ± 39,6
P02	17,4	0,66	998,4	1,25	16,8	0,0005	0,73	2266,9 ± 24,0
P03	17,4	0,93	998,3	1,75	16,7	0,0006	0,77	3942,9 ± 30,6
P04	17,4	1,19	998,2	2,25	16,7	0,0007	0,75	5813,9 ± 24,2
P05	17,4	0,26	997,0	0,50	15,3	0,0007	1,08	660,8 ± 95,5
P06	17,3	0,53	998,5	1,00	16,7	0,0007	1,01	1817,9 ± 56,1
P07	17,3	0,80	998,3	1,50	16,7	0,0008	1,02	3509,6 ± 39,4
P08	17,3	1,06	998,2	2,00	16,6	0,001	1,04	5437,2 ± 37,2
P09	17,3	1,19	998,2	2,25	16,6	0,001	0,98	6340,6 ± 40,6
P10	17,3	0,40	997,0	0,75	15,3	0,0008	1,25	1294,9 ± 107,7
P11	17,2	0,66	998,4	1,25	16,6	0,001	1,28	2880,1 ± 63,4
P12	17,2	0,93	998,3	1,75	16,6	0,0011	1,28	4861,0 ± 46,0
P13	17,1	1,06	998,2	2,00	16,6	0,0012	1,28	5930,1 ± 39,4
P14	17,0	0,53	998,4	1,00	16,8	0,0011	1,49	2203,3 ± 89,3
P15	17,0	0,80	998,4	1,50	16,8	0,0013	1,49	4091,3 ± 90,7
P16	17,0	1,06	998,2	2,00	16,9	0,0016	1,54	6401,2 ± 83,0
P17	17,5	0,40	997,1	0,75	15,3	0,0012	1,78	1570,5 ± 124,9
P18	16,9	0,66	998,4	1,25	16,9	0,0014	1,76	3363,3 ± 113,2
P19	16,9	0,93	998,3	1,75	16,9	0,0017	1,75	5550,9 ± 86,3
P20	17,5	0,27	997,0	0,50	15,5	0,0013	2,08	989,5 ± 260,0
P21	16,8	0,53	998,5	1,00	16,9	0,0015	1,97	2510,7 ± 148,0
P22	16,8	0,80	998,3	1,50	16,9	0,0019	2,08	4760,7 ± 101,4
P23	17,5	0,40	997,0	0,75	15,6	0,0016	2,28	1808,1 ± 170,3
P24	16,7	0,66	998,4	1,25	16,8	0,0019	2,30	3702,9 ± 155,7
P25	17,4	0,27	997,0	0,50	15,7	0,0017	2,55	1127,2 ± 320,2
P26	16,7	0,53	998,5	1,00	16,9	0,0019	2,47	2755,3 ± 208,4

Tabela 24 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 26 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC26-2,0).

TC26-2,0								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]
P01	17,5	0,40	997,1	0,75	16,3	0,0005	0,76	1183,1 ± 45,4
P02	16,8	0,66	998,5	1,25	17,1	0,0006	0,76	2733,0 ± 30,4
P03	16,8	0,93	998,4	1,75	17,0	0,0006	0,74	4587,1 ± 33,3
P04	16,9	1,06	998,3	2,00	17,0	0,0007	0,76	5722,5 ± 35,0
P05	17,5	0,27	997,1	0,50	16,3	0,0006	1,00	743,3 ± 64,6
P06	17,0	0,53	998,5	1,00	17,0	0,0007	1,02	2165,7 ± 59,9
P07	17,0	0,80	998,4	1,50	17,0	0,0008	1,02	4108,5 ± 39,2
P08	17,2	1,05	998,3	2,00	16,9	0,0009	1,00	6265,6 ± 38,1
P09	17,2	0,93	998,3	1,75	16,9	0,0009	1,00	5111,2 ± 36,7
P10	17,5	0,40	997,1	0,75	16,2	0,0008	1,26	1535,7 ± 83,2
P11	17,2	0,66	998,4	1,25	16,9	0,001	1,26	3344,6 ± 46,1
P12	17,2	0,93	998,3	1,75	16,8	0,0011	1,25	5618,8 ± 66,9
P13	17,3	0,53	998,4	1,00	16,8	0,0009	1,24	2353,5 ± 88,3
P14	17,3	0,53	998,4	1,00	16,7	0,0011	1,49	2605,6 ± 98,1
P15	17,3	0,80	998,3	1,50	16,6	0,0013	1,49	4765,6 ± 81,3
P16	17,3	0,93	998,3	1,75	16,6	0,0014	1,50	6018,3 ± 71,1
P17	17,5	0,40	997,1	0,75	16,1	0,0012	1,76	1880,5 ± 211,2
P18	17,4	0,66	998,4	1,25	16,5	0,0014	1,76	3930,3 ± 110,4
P19	17,4	0,93	998,2	1,75	16,4	0,0017	1,75	6421,6 ± 74,1
P20	17,5	0,27	997,0	0,50	16,0	0,0013	2,05	1158,7 ± 299,0
P21	17,4	0,53	998,4	1,00	16,4	0,0015	2,03	3113,0 ± 137,1
P22	17,4	0,80	998,3	1,50	16,3	0,0018	1,98	5469,9 ± 119,4
P23	17,5	0,40	997,0	0,75	15,8	0,0016	2,26	2201,9 ± 276,4
P24	17,5	0,66	998,3	1,25	16,2	0,0019	2,23	4467,5 ± 151,9
P25	17,6	0,27	997,0	0,50	15,7	0,0016	2,50	1255,8 ± 449,1
P26	17,5	0,53	998,4	1,00	16,2	0,0019	2,48	3505,4 ± 224,6

Tabela 25 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC40-1,2).

TC40-1,2								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]
P01	22,0	0,95	997,4	0,73	21,1	0,0012	0,74	388,1 ± 62,0
P02	22,0	1,59	997,4	1,22	21,1	0,0012	0,72	873,5 ± 55,9
P03	22,0	2,22	997,3	1,70	21,0	0,0013	0,73	1494,4 ± 83,4
P04	22,0	2,86	997,3	2,19	21,0	0,0014	0,72	2235,2 ± 121,7
P05	22,0	0,64	997,4	0,49	21,0	0,0016	1,02	257,5 ± 93,1
P06	22,0	1,27	997,4	0,97	20,9	0,0016	0,97	695,4 ± 70,0
P07	22,0	1,91	997,3	1,46	20,9	0,0019	1,05	1350,5 ± 91,0
P08	22,0	2,54	997,3	1,95	20,9	0,002	1,05	2113,8 ± 145,6
P09	22,0	0,95	997,4	0,73	20,9	0,002	1,25	517,2 ± 97,2
P10	22,1	1,59	997,3	1,22	20,8	0,0021	1,22	1079,3 ± 93,3
P11	22,1	2,22	997,3	1,70	20,8	0,0023	1,23	1822,9 ± 138,2
P12	22,1	2,86	997,2	2,19	20,8	0,0024	1,16	2649,9 ± 186,7
P13	22,0	0,64	997,4	0,49	20,8	0,0024	1,50	319,2 ± 154,2
P14	22,1	1,27	997,3	0,97	20,8	0,0024	1,41	836,5 ± 105,1
P15	22,1	1,90	997,3	1,46	20,8	0,0024	1,31	1481,6 ± 131,1
P16	22,0	3,17	997,2	2,43	21,0	0,002	0,96	2907,0 ± 166,5
P17	22,0	0,95	997,4	0,73	20,8	0,0028	1,72	615,2 ± 152,5
P18	22,0	1,59	997,4	1,22	20,8	0,003	1,71	1290,8 ± 160,5
P19	22,0	2,22	997,3	1,70	20,8	0,0033	1,71	2128,0 ± 222,1
P20	22,0	0,63	997,4	0,49	20,8	0,003	1,91	369,9 ± 175,0
P21	22,1	1,27	997,4	0,97	20,8	0,0034	1,97	998,7 ± 180,0
P22	22,1	1,90	997,3	1,46	20,8	0,0036	1,91	1787,8 ± 200,6
P23	22,1	0,95	997,4	0,73	20,9	0,0036	2,15	694,6 ± 196,1
P24	22,1	1,59	997,3	1,22	20,9	0,0039	2,18	1466,5 ± 219,4
P25	22,3	0,64	997,4	0,49	20,8	0,004	2,48	432,5 ± 287,9
P26	22,4	1,27	997,3	0,97	20,8	0,004	2,33	1094,5 ± 208,2

Tabela 26 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC40-1,6).

TC40-1,6								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]
P01	19,9	0,974	997,9	0,75	20,2	0,0011	0,75	479,7 ± 39,0
P02	19,9	1,623	997,9	1,24	20,2	0,0012	0,76	1079,5 ± 24,3
P03	19,9	2,272	997,8	1,74	20,1	0,0013	0,76	1841,9 ± 19,1
P04	19,8	2,921	997,8	2,24	20,0	0,0014	0,75	2753,0 ± 20,8
P05	19,8	0,649	998,0	0,50	19,9	0,0016	1,06	315,4 ± 81,4
P06	19,8	1,299	997,9	1,00	19,8	0,0017	1,09	885,6 ± 43,9
P07	19,7	1,948	997,9	1,49	19,8	0,0018	1,08	1640,0 ± 41,2
P08	19,7	2,596	997,8	1,99	19,7	0,0019	1,03	2541,3 ± 36,0
P09	19,7	0,974	998,0	0,75	19,7	0,0019	1,26	629,4 ± 71,8
P10	19,7	1,623	997,9	1,24	19,5	0,0021	1,25	1335,3 ± 44,5
P11	21,3	2,271	997,5	1,74	21,6	0,0022	1,24	2226,7 ± 39,0
P12	21,3	2,919	997,4	2,24	21,5	0,0025	1,24	3283,3 ± 36,1
P13	21,0	2,595	997,5	1,99	21,8	0,0028	1,46	2917,7 ± 84,0
P14	20,4	1,298	997,8	1,00	22,0	0,0024	1,52	1045,3 ± 59,6
P15	20,4	1,947	997,7	1,49	22,0	0,0027	1,52	1896,4 ± 67,6
P16	18,9	3,246	997,9	2,49	19,5	0,0021	0,99	3592,6 ± 26,5
P17	18,7	0,974	998,2	0,75	19,0	0,0028	1,77	755,6 ± 110,6
P18	18,7	1,623	998,1	1,24	18,7	0,003	1,75	1565,3 ± 58,5
P19	18,6	2,272	998,0	1,74	18,6	0,0034	1,77	2617,4 ± 71,3
P20	18,6	0,649	998,2	0,50	18,6	0,003	2,00	465,9 ± 193,8
P21	18,6	1,298	998,1	0,99	18,7	0,0033	2,02	1207,8 ± 112,6
P22	18,5	1,947	998,1	1,49	18,8	0,0036	1,96	2164,1 ± 99,6
P23	18,5	0,974	998,2	0,75	18,7	0,0036	2,27	852,1 ± 211,3
P24	18,5	1,624	998,1	1,24	18,6	0,004	2,25	1763,1 ± 119,7
P25	18,5	0,648	998,2	0,50	18,3	0,0038	2,50	508,7 ± 243,6
P26	18,5	1,299	998,2	1,00	18,3	0,0042	2,51	1364,5 ± 187,1

Tabela 27 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 40,8 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC40-2,0).

TC40-2,0								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]
P01	20,3	0,98	997,8	0,75	20,7	0,0012	0,76	625,0 ± 37,3
P02	20,3	1,63	997,8	1,25	20,6	0,0013	0,77	1387,5 ± 41,5
P03	20,3	2,28	997,7	1,75	20,6	0,0014	0,76	2360,5 ± 38,4
P04	20,3	2,93	997,6	2,25	20,5	0,0016	0,81	3537,8 ± 37,8
P05	20,2	0,65	997,9	0,50	20,3	0,0015	1,04	391,5 ± 94,1
P06	20,2	1,31	997,8	1,00	20,3	0,0017	1,09	1119,8 ± 53,0
P07	20,2	1,96	997,8	1,50	20,3	0,0018	1,01	2032,7 ± 48,3
P08	20,0	2,61	997,7	2,00	20,5	0,002	1,05	3232,3 ± 39,3
P09	20,2	0,98	997,8	0,75	20,4	0,002	1,29	801,3 ± 94,0
P10	20,4	1,63	997,8	1,25	20,4	0,0022	1,28	1691,7 ± 56,2
P11	20,2	2,28	997,7	1,75	20,4	0,0024	1,26	2828,5 ± 54,9
P12	20,1	2,93	997,6	2,25	20,4	0,0026	1,24	4108,0 ± 38,6
P13	20,1	0,65	997,9	0,50	20,4	0,0022	1,48	479,1 ± 185,2
P14	20,1	1,30	997,8	1,00	20,3	0,0026	1,60	1336,3 ± 94,5
P15	20,1	1,96	997,8	1,50	20,2	0,0028	1,52	2392,7 ± 88,8
P16	20,1	2,28	997,7	1,75	20,3	0,0028	1,48	3020,5 ± 66,5
P17	19,8	0,98	997,9	0,75	20,0	0,0028	1,77	940,6 ± 138,0
P18	19,8	1,63	997,9	1,25	19,9	0,0032	1,82	1977,3 ± 100,5
P19	19,7	2,28	997,8	1,75	19,9	0,0034	1,73	3222,8 ± 93,6
P20	19,7	0,65	998,0	0,50	19,8	0,0033	2,15	583,0 ± 244,7
P21	19,7	1,30	997,9	1,00	19,7	0,0032	1,95	1466,1 ± 141,5
P22	19,7	1,96	997,8	1,50	19,6	0,0038	2,00	2726,9 ± 97,0
P23	19,7	0,98	998,0	0,75	19,4	0,0038	2,35	1083,1 ± 221,4
P24	19,7	1,63	997,9	1,25	19,3	0,004	2,23	2180,6 ± 143,4
P25	19,8	0,65	997,9	0,50	20,2	0,0038	2,50	635,9 ± 334,9
P26	19,8	1,30	997,9	1,00	20,1	0,0044	2,57	1725,5 ± 203,9

Tabela 28 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 1,2 mm (TC50-1,2).

TC50-1,2								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]
P01	18,2	1,47	998,3	0,75	16,2	0,0017	0,77	317,3 ± 43,4
P02	18,2	2,45	998,3	1,25	16,3	0,0018	0,77	703,4 ± 88,0
P03	18,2	3,42	998,2	1,75	16,3	0,0019	0,76	1220,1 ± 153,8
P04	18,2	4,40	998,2	2,25	16,2	0,002	0,74	1829,2 ± 236,7
P05	18,1	0,98	998,3	0,50	16,1	0,0024	1,07	212,5 ± 85,2
P06	18,1	1,96	998,3	1,00	16,1	0,0025	1,05	571,7 ± 71,7
P07	18,1	2,93	998,3	1,50	16,1	0,0026	1,04	1066,6 ± 129,1
P08	18,1	3,91	998,2	2,00	16,1	0,0029	1,07	1699,7 ± 213,1
P09	18,1	1,47	998,3	0,75	16,1	0,0029	1,25	411,2 ± 78,2
P10	18,1	2,45	998,3	1,25	16,0	0,003	1,25	874,3 ± 107,4
P11	18,1	3,42	998,2	1,75	16,0	0,0033	1,25	1466,4 ± 185,3
P12	18,0	4,40	998,2	2,25	16,0	0,0037	1,29	2215,5 ± 291,3
P13	19,0	0,98	998,4	0,50	16,0	0,0034	1,50	259,7 ± 142,8
P14	18,0	1,96	998,3	1,00	16,0	0,0035	1,49	678,2 ± 108,2
P15	18,0	2,93	998,3	1,50	15,9	0,0039	1,53	1263,6 ± 153,2
P16	18,0	3,91	998,2	2,00	15,9	0,0041	1,47	1947,5 ± 241,7
P17	18,0	1,47	998,3	0,75	15,9	0,0041	1,76	490,6 ± 141,7
P18	18,0	2,45	998,3	1,25	15,9	0,0045	1,79	1039,0 ± 124,6
P19	18,0	3,42	998,2	1,75	15,9	0,0047	1,76	1712,9 ± 217,6
P20	18,1	0,98	998,3	0,50	15,9	0,0046	2,04	296,4 ± 202,6
P21	18,1	1,96	998,3	1,00	16,0	0,0048	1,98	795,0 ± 141,3
P22	18,5	2,93	998,2	1,50	15,5	0,0052	1,98	1446,7 ± 177,3
P23	18,6	1,47	998,2	0,75	15,5	0,0053	2,24	549,4 ± 196,7
P24	18,6	2,45	998,2	1,25	15,4	0,0057	2,26	1175,9 ± 144,8
P25	18,8	0,97	998,2	0,50	15,3	0,0058	2,56	337,4 ± 298,2
P26	18,8	1,96	998,2	1,00	15,4	0,006	2,47	883,6 ± 206,7

Tabela 29 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 1,6 mm (TC50-1,6).

TC50-1,6								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]
P01	19,7	1,47	998,1	0,75	16,0	0,0018	0,77	396,9 ± 33,0
P02	19,8	2,45	998,0	1,25	15,9	0,0019	0,78	866,0 ± 27,7
P03	19,8	3,43	997,8	1,75	15,8	0,002	0,77	1469,5 ± 20,1
P04	19,7	4,41	997,8	2,25	15,8	0,002	0,75	2161,2 ± 22,9
P05	19,6	0,98	998,1	0,50	15,7	0,0023	1,02	258,9 ± 102,3
P06	19,7	1,96	998,1	1,00	15,5	0,0025	1,08	701,3 ± 58,5
P07	19,7	2,94	997,9	1,50	15,5	0,0027	1,08	1298,0 ± 41,9
P08	19,7	3,92	997,9	2,00	15,5	0,0029	1,06	2026,3 ± 38,2
P09	19,7	1,47	998,1	0,75	15,5	0,0029	1,25	495,8 ± 89,3
P10	19,7	2,45	998,0	1,25	15,5	0,0031	1,25	1050,0 ± 55,0
P11	19,7	3,43	997,8	1,75	15,5	0,0033	1,25	1745,6 ± 53,6
P12	19,6	4,41	997,8	2,25	15,5	0,0035	1,23	2580,8 ± 34,3
P13	19,7	0,98	998,1	0,50	15,5	0,0034	1,51	313,8 ± 182,5
P14	19,8	1,96	998,0	1,00	15,5	0,0037	1,54	816,3 ± 119,1
P15	19,8	2,94	997,9	1,50	15,6	0,0038	1,50	1468,8 ± 63,6
P16	19,8	3,92	997,9	2,00	15,6	0,0044	1,56	2327,6 ± 53,1
P17	19,7	1,47	998,1	0,75	15,4	0,004	1,73	578,7 ± 156,0
P18	19,8	2,45	998,0	1,25	15,4	0,0044	1,75	1202,6 ± 93,4
P19	19,8	3,43	997,9	1,75	15,5	0,0048	1,76	2006,0 ± 91,4
P20	19,8	0,98	998,1	0,50	15,6	0,0045	2,00	363,3 ± 235,3
P21	19,9	1,96	998,0	1,00	15,5	0,005	2,08	931,8 ± 169,0
P22	19,9	2,94	997,9	1,50	15,8	0,0052	1,99	1676,4 ± 89,8
P23	19,9	1,47	998,0	0,75	15,7	0,0052	2,22	667,5 ± 218,7
P24	20,0	2,45	997,9	1,25	15,6	0,0058	2,29	1397,3 ± 114,8
P25	20,1	0,98	998,0	0,50	15,5	0,0057	2,49	404,2 ± 290,7
P26	20,3	1,96	997,9	1,00	15,4	0,0063	2,55	1070,7 ± 209,9

Tabela 30 – Resultados experimentais para a tubulação corrugada com diâmetro interno de 50 mm e largura de cavidade de 2,0 mm (TC50-2,0).

TC50-2,0								
P	T_L [°C]	$\dot{m}_L$ [kg/s]	ρ_L [kg/m ³]	J_L [m/s]	T_G [°C]	$\dot{m}_G$ [kg/s]	J_G [m/s]	$dP/dL _{LG}$ [Pa/m]
P01	23,3	1,47	997,1	0,75	24,0	0,0017	0,77	543,6 ± 46,8
P02	23,4	2,45	997,1	1,25	24,1	0,0018	0,77	1231,2 ± 37,4
P03	23,3	3,43	997,0	1,75	24,1	0,0019	0,75	2092,8 ± 39,3
P04	23,2	4,40	996,9	2,25	24,1	0,0021	0,77	3194,5 ± 40,3
P05	23,0	0,98	997,2	0,50	24,0	0,0021	0,99	343,9 ± 135,9
P06	23,0	1,96	997,1	1,00	23,9	0,0023	1,00	959,3 ± 53,6
P07	23,0	2,94	997,1	1,50	23,9	0,0025	1,01	1811,7 ± 34,7
P08	22,9	3,92	997,0	2,00	23,8	0,0028	1,04	2899,6 ± 45,8
P09	22,9	1,47	997,2	0,75	23,8	0,0028	1,24	696,4 ± 102,9
P10	22,9	2,45	997,1	1,25	23,8	0,003	1,27	1495,3 ± 66,6
P11	22,8	3,43	997,1	1,75	23,5	0,0032	1,25	2499,9 ± 51,2
P12	22,7	4,40	997,1	2,25	23,4	0,0036	1,26	3760,9 ± 59,5
P13	22,5	0,98	997,3	0,50	23,4	0,0033	1,50	430,0 ± 247,5
P14	22,5	1,96	997,3	1,00	23,4	0,0035	1,52	1158,6 ± 131,9
P15	22,5	2,94	997,2	1,50	23,5	0,0037	1,48	2093,9 ± 89,6
P16	22,4	3,92	997,1	2,00	23,6	0,0042	1,51	3364,8 ± 73,7
P17	22,3	1,47	997,3	0,75	23,5	0,004	1,79	825,4 ± 227,6
P18	22,3	2,45	997,3	1,25	23,2	0,0043	1,74	1717,8 ± 119,8
P19	22,3	3,43	997,2	1,75	23,2	0,0047	1,76	2907,2 ± 78,3
P20	22,3	0,98	997,4	0,50	23,2	0,0045	2,03	502,9 ± 350,8
P21	22,3	1,96	997,3	1,00	23,2	0,005	2,09	1388,8 ± 201,3
P22	22,3	2,94	997,3	1,50	23,2	0,0051	1,97	2408,6 ± 101,3
P23	22,3	1,47	997,4	0,75	23,2	0,0051	2,23	935,6 ± 284,6
P24	22,3	2,45	997,3	1,25	23,1	0,0057	2,27	2020,6 ± 192,0
P25	22,3	0,98	997,4	0,50	23,1	0,0055	2,47	549,7 ± 430,1
P26	22,3	1,96	997,3	1,00	23,0	0,006	2,51	1516,9 ± 275,4