

Paula Stofer Cordeiro de Farias

Método óptico para caracterização do filme líquido em escoamento horizontal bifásico anular

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pósgraduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Rio de Janeiro, Setembro de 2010



Paula Stofer Cordeiro de Farias

Método óptico para caracterização do filme líquido em escoamento horizontal bifásico anular

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

> Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo Orientador Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

> > Prof. Jader R. Barbosa Jr. Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Sidney Stuckenbruck Olympus Software Científico e Engenharia

> Prof. José Eugenio Leal Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 03 de setembro de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Paula Stofer Cordeiro de Farias

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2007 e em Engenharia de Produção Mecânica em 2008.

Ficha Catalográfica

Farias, Paula Stofer Cordeiro de

Método óptico para caracterização do filme líquido em escoamento horizontal bifásico anular / Paula Stofer Cordeiro de Farias ; orientador: Luis Fernando Azulguir Azevedo. – 2010.

185 f. : il.(color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010. Inclui bibliografia

 Engenharia mecânica – Teses. 2. Escoamento bifásico anular horizontal. 3. Filme de líquido. 4. Métodos ópticos. 5. Fluorescência induzida por laser.
 Azevedo, Luis Fernando Azulguir. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. V. Título.

CDD: 621

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0821298/CA

Para meus pais, Cyro e Angela, pelo incentivo e dedicação.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer especialmente ao meu orientador, Luis Fernando Azevedo, pela motivação diária, orientação e entusiasmo a cada conquista neste projeto.

À Petrobras, em nome do Engenheiro Ricardo Serfaty, pelo patrocínio e à PUC-Rio pela infraestrutura, sem os quais este trabalho não poderia ter sido concretizado.

Gostaria de aproveitar também este agradecimento para parabenizar meus alunos de iniciação científica, Bruno e Carlos, pelo comprometimento, maturidade e dedicação neste projeto em todos os momentos.

Gostaria de agradecer inúmeras vezes ao técnico do laboratório, Leo, que não poupou esforços para sempre atender meus pedidos e ao Fabio e Luiz Ebs, pelas orientações teóricas e ajuda nas programações.

Um obrigado também, aos meus amigos do laboratório, pelo apoio e companheirismo todos os dias.

Aos meus amigos, principalmente à Priscilla, agradeço por ter vocês ao meu lado, durante todo esse período, onde muitas vezes precisei de um apoio.

Não posso deixar de agradecer ao meu avô, por servir como minha inspiração a cada realização profissional e pelas palavras de incentivo.

Ao meu namorado, Flavio, pelo amor, carinho e compreensão sem limites.

Acima de tudo, gostaria de agradecer meus pais, Angela e Cyro, e minha irmã, Fernanda, que sempre me ensinaram a enfrentar as dificuldades e nesta caminhada foram indispensáveis para essa nova conquista.

Resumo

Farias, Paula Stofer Cordeiro de; Azevedo, Luis Fernando A. **Método óptico para caracterização do filme líquido em escoamento horizontal bifásico anular**. Rio de Janeiro, 2010. 185p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Uma técnica óptica não intrusiva foi desenvolvida para fornecer imagens instantâneas do filme líquido em escoamento anular horizontal ar-água. Imagens instantâneas das seções longitudinais e tranversais do escoamento revelaram o comportamento dinâmico do filme de líquido ao redor do tubo. A técnica PLIF -*Planar Laser Induced Fluorescence* – foi utilizada para separar a luz emitida pelo filme daquela (mais intensa) refletida na interface ar-água. A seção de testes utilizada foi fabricada em material com índice de refração próximo ao da água, o que permitiu que regiões muito próximas às paredes fossem estudadas sem distorções ópticas apreciáveis. Imagens longitudinais do filme de líquido foram capturadas utilizando uma câmera de alta velocidade sincronizada com um laser de alta taxa de repetição de pulsos. Foram realizados testes com frequências de aquisição de 250 e 3000 Hz. Um algoritmo computacional foi especialmente desenvolvido para medir automaticamente a posição da interface ar-água em cada imagem. A espessura de filme líquido foi medida em duas posições axiais em cada imagem, gerando dados para a variação temporal da espessura do filme de líquido em duas posições diferentes. As velocidades de propagação das ondas de líquido foram calculadas através da correlação cruzada dos sinais de espessura de filme em função do tempo das duas posições axiais. O espectro de frequência das ondas foi obtido a partir do sinal transiente de espessura do filme de líquido capturado. Os resultados obtidos permitiram estudar a dependência das propriedades do filme líquido com os parâmetros globais do escoamento, tais como as velocidades superficiais de gás e líquido. O trabalho realizado também implementou uma técnica de visualização transversal, empregando para isso duas câmeras digitais de alta velocidade em uma montagem estereoscópica. O laser de alta repetição foi montado de modo que seu feixe iluminasse a seção tranversal do tubo. Imagens obidas com as duas câmeras foram distorcidas usando um alvo de calibração e um polinômio para correção das imagens. Estas imagens distorcidas foram unidas para reconstruir a forma completa do filme de líquido na seção tranversal do tubo em função do tempo. Os resultados obtidos com a técnica estereoscópica desenvolvida constituem-se em uma contribuição original na área de medição de escoamentos bifásicos. Comparações com os resultados disponíveis na literatura indicam que o presente trabalho fornece resultados com níveis de incerteza experimentais equivalentes a outras técnicas bem estabelecidas. Os resultados obtidos com as técnicas desenvolvidas forneceram informações úteis para auxiliar o entendimento do comportamento dinâmico do filme de líquido em escoamentos bifásicos anulares.

Palavras-chave

Escoamento bifásico anular horizontal, filme de líquido, métodos ópticos, fluorescência induzida por laser.

Abstract

Farias, Paula Stofer Cordeiro de; Azevedo, Luis Fernando A. **Optical method for caracterizing liquid film in horizontal two-phase annular flow.** Rio de Janeiro, 2010. 185p. Master Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A non-intrusive optical technique was employed to provide time-resolved images of the lower portion of the liquid film of horizontal annular flow of air and water, revealing the interfacial wave behavior. Time-resolved images of the pipe cross section revealed the dynamics of the complete liquid film around the pipe wall. The planar laser induced fluorescence technique (PLIF) was implemented to allow for the optical separation of the light emitted by the film from that (more intense) scattered by the air-water interface. The visualization test section was fabricated from a tube material which has nearly the same refractive index as water, what allowed for the visualization of the liquid film at regions very close to the pipe wall. Longitudinal images of the liquid film were captured using a high speed digital video camera synchronized with a high repetition rate laser. Data sets were collected with sampling camera frequencies ranging from 250 to 3000 Hz. A specially developed image processing algorithm was employed to automatically detect the position of the air-water interface in each image frame. The thickness of the liquid film was measured at two axial stations in each processed image frame, providing time history records of the film thickness at two different positions. Wave velocities were measured by cross-correlating the amplitude signals from the two axial positions. Wave frequency information was obtained by analyzing the time-dependent signals of film thickness recorded. The results obtained allowed for the verification of the variation of the liquid film characteristics with global flow parameters, such as the liquid and gas flow superficial velocities. For the film cross section observations, two high speed digital video cameras were used in a stereoscopic arrangement. The high repetition rate laser had its laser sheet mounted so as to illuminate a pipe cross section. Images from the left and right cameras were distorted by the use of a calibration target and an image correction algorithm. Distorted images from each camera were then joined to yield the complete instantaneous cross section image of the liquid film. Comparisons with results from different techniques available in

literature indicate that the present technique presents equivalent accuracy in measuring the liquid film properties. The stereoscopic technique developed is an original contribution of the present work to the set of experimental techniques available for the study of two-phase flows. Time–resolved images of longitudinal and cross section views of the film were recorded and analyzed, what constitutes in valuable information for the understanding of the dynamics of the liquid film in horizontal annular flow.

Keywords

Two-phase horizontal annular flow, liquid film, optical methods, laser induced fluorescence.

Sumário

1 Introdução	27
1.1. Organização do trabalho	32
2 Revisão Bibliográfica	33
2.1. Mecanismos de Redistribuição do Filme de Líquido	34
2.2. Estudos Experimentais em Escoamentos Anulares	37
3 Técnicas Ópticas de Visualização Utilizadas	42
3.1. Fluorescência Planar Induzida por Laser	43
3.2. Equalização do Índice de Refração	45
3.3. Montagem Óptica	49
3.3.1. Visualização Longitudinal Instantânea do Filme de Líquido	49
3.3.2. Visualização Transversal Instantânea do Filme de Líquido	52
4 Montagem Experimental	55
4.1. Seção de Testes com Tubo de Diâmetro Interno de 15,8 mm	56
4.1.1. Sistema de Escoamento de Água	58
4.1.2. Sistema de Escoamento de Ar	58
4.1.3. Medição de Pressão e Temperatura	59
4.1.4. Tubulação da Seção de Testes	59
4.1.5. Tanque de Separação	60
4.1.6. Sistema de Medição por Fluorescência Induzida por Laser - PLIF	61
4.1.6.1. Laser	62
4.1.6.2. Corante Fluorescente	62
4.1.6.3. Caixa de Visualização	62
4.1.6.4. Sincronizador de Sinais	64
4.1.6.5. Câmera Digital e Lentes Objetivas	64
4.1.6.6. Filtros Ópticos	65
4.1.6.7. Conjunto de Lentes Formadoras do Plano de Luz e Espelho	67
4.2. Seção de Testes com Tubo de Diâmetro Interno de 50,8 mm	68
4.2.1. Sistema de Escoamento da Água	69
4.2.2. Sistema de Escoamento de Ar	69

4.2.3. Medição de Pressão e Temperatura	69
4.2.4. Tubulação da Seção de Testes	69
4.2.5. Sistema de Separação	71
4.2.6. Sistema de Medição por Fluorescência Induzida por Laser - PLIF	71
4.2.6.1. Caixa de Visualização Octogonal	72
4.2.6.2. Lentes Objetivas	73
5 Experimentos para Medição Longitudinal do Filme de Líquido	74
5.1. Aquisição das Imagens Longitudinais	74
5.1.1. Preparação da Seção de Testes e Acionamento dos Equipamentos	75
5.1.2. Calibração das Imagens	76
5.1.3. Captura das Imagens	79
5.1.4. Resolução Espacial das Imagens	80
5.2. Processamento de Imagens Longitudinais	85
5.2.1. Definição da Posição e Largura das Sondas de Medição	86
5.2.2. Aumento de Contraste	87
5.2.3. Determinação da Posição da Parede Interna do Tubo	95
5.2.4. Medição da Espessura de Filme	95
6 Experimentos para Medição Transversal do Filme de Líquido	101
6.1. Aquisição das Imagens Transversais	101
6.1.1. Acionamento dos Equipamentos	101
6.1.2. Calibração das Imagens	102
6.1.3. Procedimento de Distorção das Imagens de Calibração	105
6.1.4. União das Imagens de Calibração	107
6.1.5. Captura das Imagens	109
6.2. Processamento das Imagens Transversais do Filme de Líquido	111
6.2.1. Definição da Posição e Largura da Sonda de Medição	111
6.2.2. Procedimento para Aumento do Contraste das Imagens	112
6.2.3. Distorção das Imagens	113
6.2.4. União das Imagens	113
6.2.5. Aplicação da Máscara Externa	114
6.2.6. Determinação da Espessura de Filme Líquido	116
6.3. Teste de Iluminação	117
7 Extração do Dodos Quantitativos	110
 7 Extração de Dados Quantilativos 7 1. Febreacura Mádia da Filma da Líquida 	100
<i>i</i> . I. Espessura iviedia do Filme de Liquido	120

7.2. Média Quadrática da Espessura de Filme de Líquido – RMS	120
7.3. Velocidade de Propagação das Ondas de Líquido	120
7.4. Espectro de Frequência do Sinal de Espessura do Filme de Líquido	122
7.5. Histograma da Espessura de Filme Líquido	124
8 Resultados	125
8.1. Medidas Longitudinais do Filme de Líquido	125
8.1.1. Variação Temporal da Espessura de Filme Líquido	127
8.1.2. Espessura Média do Filme de Líquido	130
8.1.3. Média Quadrática da Espessura de Filme Líquido – RMS	135
8.1.4. Velocidade de Propagação das Ondas de Líquido	136
8.1.5. Espectro de Frequência da Espessura do Filme de Líquido	141
8.1.6. Histograma de Espessura de Filme de Líquido	152
8.1.7. Evolução Espacial e Temporal das Ondas de Líquido	158
8.2. Medidas Transversais do Filme de Líquido	162
8.2.1. Medição da Espessura de Filme Líquido	164
8.2.2. Comparação entre Medidas na Imagem Longitudinal e Transversal	165
9 Conclusão	167
10 Bibliografia	171
Apêndice	176
A Calibração e Correção do Rotâmetro para Medição da Vazão de Ar	176
B Cálculo das Incertezas de Medição da Técnica Desenvolvida	178
B.1 Incerteza na Técnica de Medição da Espessura de Filme de Líquido	178
B.2 Incerteza na Medição da Espessura de Filme Líquido Média	180
B.3 Incerteza no Cálculo da Velocidade de Onda	183

Lista de figuras

Figura 1.1 - Escoamento bifásico em dutos horizontais (Tong & Tang, 1997). 29 Figura 1.2 - Mapa de padrão de escoamento horizontal ar-água para tubulação com 25 mm de diâmetro interno a 25°C e 1 bar (Mandhane et al., 1974). A linha contínua delimita as transições a partir de observações experimentais e as regiões hachuradas representam previsões teóricas. 30 Figura 1.3 - Mapa de padrão de escoamento vertical ar-água para tubulação com 32 mm de diâmetro interno (Hewitt & Roberts, 1969). 30 Figura 2.1 - Representação esquemática para o mecanismo de escoamento secundário de gás, possivelmente responsável pela redistribuição do filme de líquido (figura retirada de Belt, 2007) 34 Figura 2.2 - Representação esquemática do mecanismo de espalhamento do filme de líquido pela passagem da onda (figura retirada de Kopplin, 2004). 35 Figura 2.3 - Representação esquemática do mecanismo de bombeamento pelas ondas (figura retirada de Kopplin, 2004). 36 Figura 3.1 - Espectro de absorção e fluorescência (Fonte: Thermo Scientific). 43 Figura 3.2 - Vista esquemática da técnica de visualização baseada na Fluorescência Induzida por Plano de Laser – PLIF aplicada a escoamento 44 bifásico anular horizontal. Figura 3.3 - Diagrama do principio de funcionamento do sistema de visualização empregando a técnica PLIF. 45 Figura 3.4 - Comparação entre o índice de refração do acrílico e da solução salina de iodeto de sódio. 46 Figura 3.5 - Imagens do escoamento do filme de líquido inferior em escoamento anular obtidas com água com Rodamina 610 escoando em tubulação fabricada em FEP. 47 Figura 3.6 - Imagens do escoamento do filme de líquido inferior em escoamento anular obtidas com solução salina de água e iodeto de sódio com Rodamina 610 escoando em tubulação fabricada em acrílico. 47 Figura 3.7 - Teste de distorção de imagem utilizando (a) tubulação de FEP com água e (b) tubulação de vidro com água. 48

Figura 3.8 - Imagem típica capturada pela técnica de visualização 50 longitudinal implementada. Figura 3.9 - Vista esquemática frontal da montagem óptica utilizada para a 51 visualização e medição longitudinal do filme de líquido. Figura 3.10 - Imagem típica capturada pela técnica de visualização 52 transversal implementada. Figura 3.11 - Vista esquemática superior da montagem óptica estereoscópica utilizada para a visualização e medição da seção transversal do filme de líquido. 54 Figura 4.1 - Vista geral esquemática da seção de testes construída. 56 Figura 4.2 - Visão geral da seção de testes com diâmetro de 15,8 mm. 57 Figura 4.3 - Visão lateral da seção de testes com diâmetro de 15,8 mm. 57 Figura 4.4 - Misturador ar-água 60 Figura 4.5 - Vista do tanque com destaque para a placa separadora em seu interior. 61 Figura 4.6 - Esquema da montagem óptica para aplicação da técnica PLIF. 61 Figura 4.7 - Energia emitida por cada pulso do laser em função da taxa de repetição (Fonte: www.new-wave.com). 62 Figura 4.8 - Vista superior da caixa de visualização da seção com tubo de 63 15,8 mm de diâmetro. Figura 4.9 - Curva de transmissividade do filtro óptico utilizado (Fonte: www.mellesgriot.com). 66 Figura 4.10 - Imagens do alvo de calibração posicionado dentro do tubo preenchido com solução de água e rodamina e iluminado com um feixe cilíndrico de luz verde proveniente do laser.(a) com filtro óptico passa-alta e (b) sem filtro óptico. 66 Figura 4.11 - Diagrama de lentes para formação do plano de luz com um laser (Aniceto P. H. S., 2007). 67 Figura 4.12 - Visão geral da secão de testes com tubo de diâmetro de 50.8 mm. 68 Figura 4.13 - Acoplamento entre a base das duas seções de testes. 70 Figura 4.14 - Sistema de separação ar-água em dois estágios. 71 Figura 4.15 - Vista superior da caixa de visualização construída para a seção de 50,8 mm. Setas indicam as faces da caixa para realizar a 72 visualização longitudinal e transversal. Figura 5.1 - Configuração utilizada para a captura de imagens longitudinais

Fig WV Fig pr cil

do filme de líquido na parte inferior do tubo.	76
Figura 5.2 - Alvo de calibração introduzido na seção de testes.	77
Figura 5.3 - Detalhe do alvo de calibração posicionado dentro na seção de	
testes e alinhado com o plano de laser.	77
Figura 5.4 - Imagem do alvo de calibração posicionado dentro da seção de	
testes capturado pela câmera.	78
Figura 5.5 - Esquema das configurações ópticas aplicadas nos testes	
longitudinais para a seção de 15,8 mm de diâmetro.	81
Figura 5.6 - Esquema das configurações ópticas aplicadas nos testes	
longitudinais para a seção de 50,8 mm de diâmetro.	83
Figura 5.7 - Sequência de imagens longitudinais típicas do filme inferior	
obtidas a 3000Hz (sentido do escoamento da direita para esquerda).	84
Figura 5.8 - Representação esquemática das sondas de medição da	
espessura do filme de líquido sobre uma imagem digitalizada.	86
Figura 5.9 - Imagem original típica capturada e o histograma	
correspondente.	88
Figura 5.10 - Imagem pré-processada utilizando filtros medianos e	
equalização adaptativa global e o histograma correspondente.	89
Figura 5.11 - (a) Curva de equalização do histograma para α constante. (b)	
Curva de equalização do histograma para <i>b</i> constante.	90
Figura 5.12 - Comparação entre a curva de equalização do histograma	
com e sem normalização.	92
Figura 5.13 - Curva de equalização do histograma utilizada na imagem da	
Figura 5.9 para α=4 e <i>b</i> =0,5.	92
Figura 5.14 - Imagem processada utilizando a função sigmóide adaptativa	
para equalização do histograma por coluna e o seu histograma	
correspondente.	93
Figura 5.15 - Filtro aplicado a cada coluna da imagem da Figura 5.9 para	
redução de franjas.	94
Figura 5.16 - Imagem equalizada com função sigmóide em cada coluna da	
imagem após a utilização do filtro para suavização das franjas e o	
histograma correspondente.	95
Figura 5.17 - (a) Imagem binarizada (b) Espessura de filme líquido medida	
superposta à imagem original.	97
Figura 5.18 - Imagens longitudinais do filme líquido em função do tempo.	
Cruzes vermelha e azul indicam as espessuras de filme determinadas pelo	

procedimento de processamento de imagem desenvolvido.	99
Figura 5.19 - Exemplo típico da variação temporal da espessura de filme	
líquido inferior determinado pelo procedmento de processamento de	
imagens desenvolvido ($U_{s/}=0,112 \text{ m/s}$ e $U_{sg}=20 \text{ m/s}$).	100
Figura 6.1 - Montagem óptica estereoscópica para a visualização da seção	
transversal do escoamento.	102
Figura 6.2 - Alvo para calibração de imagens estereoscópicas com	
destaque para a malha de pontos usinada e pintada de branco.	103
Figura 6.3 - Alvo de calibração posicionado dentro do tubo de testes e	
alinhado com o plano do laser.	103
Figura 6.4 - Alvo de calibração posicionado dentro da seção de testes	
preenchida com a solução de água e rodamina. Imagens capturadas pelas	
câmeras da esquerda e da direita.	104
Figura 6.5 - Imagem do alvo de calibração com destaque para os pontos	
vermelhos referentes a seleção feita pelo usuário.	106
Figura 6.6 - Imagem do alvo de calibração distorcido após a aplicação do	
polinômio de distorção.	107
Figura 6.7 - Imagem do alvo de calibração com destaque nos pontos azuis	
que são projeções dos pontos anteriormente marcados pelo usuário em	
uma imagem com observação em ângulo.	107
Figura 6.8 - Imagens do alvo de calibração da esquerda e da direita já	
distorcidas.	108
Figura 6.9 - Imagem do alvo de calibração resultante da união entre as	
imagens distorcidas obtidas com as câmeras da esquerda e da direita.	108
Figura 6.10 - Imagens observadas em ângulo do filme de líquido	
capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita.	110
Figura 6.11 - Representação esquemática da sonda para medição da	
espessura do filme de líquido sobre imagem digitalizada.	112
Figura 6.12 - Imagens instantâneas distorcidas do filme líquido obtidas	
pelas câmeras da esquerda e da direita.	113
Figura 6.13 - Imagem instantânea típica do filme de líquido no escoamento	
anular horizontal após a distorção e união das imagens capturadas pela	
câmera da esquerda e da direita.	114
Figura 6.14 - Imagem do tubo cheio da solução de água e rodamina	
distorcida e unida.	114
Figura 6.15 – Máscara criada a partir das imagens do tubo cheio.	115

Figura 6.16 - Sequência de imagens instantâneas típicas do filme de	
líquido após a aplicação da máscara.	116
Figura 6.17 – Imagens obtidas com iluminação (a) inferior, (b) lateral e (c)	
superior	118
Figura 7.1 - Exemplo típico da variação temporal da espessura de filme	
líquido inferior determinado pelo procedimento de processamento de	
imagens desenvolvido ($U_{s}=0,112 \text{ m/s}$ e $U_{sg}=20 \text{ m/s}$).	119
Figura 7.2 - Função de correlação cruzada da espessura de filme medida	
na posição das sondas 1 e 2 para U_{sg} = 34 m/s e U_{sl} =0.112 m/s. A linha	
contínua passando pelos pontos representa um ajuste por uma função	
Gaussiana.	122
Figura 7.3 - Comparação entre os espectros do sinal original com aqueles	
obtidos pelo periodograma com 16 janelas de Hamming e pela média de	
16 espectros de experimentos independentes para U_{sg} =28 m/s e U_{sf} =0,112	
<i>m</i> /s e seção de 15,8 mm.	123
Figura 7.4 - Histograma da espessura de filme líquido para U_{sg} =20 m/s e	
<i>U_s=0.112 m/s</i> e D = 15,8 mm.	124
Figura 8.1 - Mapa de padrões de escoamento de Taitel & Dukler (1976),	
para seção de testes com diâmetro de 15,8 mm, com os pares de vazão	
ar-água no regime de escoamento anular estudados.	126
Figura 8.2 - Mapa de padrões de escoamento de Taitel & Dukler (1976),	
para seção de testes com diâmetro de 50,8 mm, com os pares de vazão	
ar-água no regime de escoamento anular estudados.	126
Figura 8.3 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 20 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.056 \text{ m/s}$,	
para a seção de 15,8 mm de diâmetro.	128
Figura 8.4 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 24 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.056 \text{ m/s}$	
para a seção de 15,8 mm de diâmetro.	128
Figura 8.5 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 28 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.056 \text{ m/s}$	
para a seção de 15,8 mm.	129
Figura 8.6 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 34 \text{ m/s}$ e $U_{sl} = 0.056 \text{ m/s}$	
para a seção de 15,8 mm.	129
Figura 8.8 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a	
seção de 15,8 mm em função da velocidade superficial do líquido.	131
Figura 8.9 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a	
seção de 50,8 mm em função da velocidade superficial do gás.	131
Figura 8.10 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para	

a seção de 50,8 mm em função da velocidade superficial do líquido. 132 Figura 8.11 - Comparação dos resultados da espessura média de filme líquido inferior entre o presente trabalho e os resultados de Paras & Karabelas (1991) para tudo com 50,8 mm diâmetro e $U_{sl} = 0,03 \text{ m/s}$. 134 Figura 8.12 - Comparação dos resultados da espessura média de filme líquido inferior entre o presente trabalho e os resultados de Paras & Karabelas (1991) para tudo com 50,8 mm diâmetro e $U_{sl} = 0,06$ m/s. 134 Figura 8.13 - Razão entre a espessura RMS e a espessura média de filme em função da velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm. 136 Figura 8.14 - Razão entre a espessura RMS e a espessura média de filme em função da velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm. 136 Figura 8.15 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm. 138 Figura 8.16 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial do líquido para a seção de 15,8 mm. 138 Figura 8.17 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de gás para a seção de 50,8 mm. 139 Figura 8.18 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de líquido para a seção de 50,8 mm. 139 Figura 8.19 - Comparação entre os resultados da velocidade de onda do presente trabalho e Paras & Karabelas (1991) para a seção de 50,8 mm e 140 $U_{sl} = 0,03 \text{ m/s}.$ Figura 8.20 - Comparação dos resultados da velocidade de onda do presente trabalho e Paras & Karabelas (1991) para a seção de 50,8 mm e $U_{sl} = 0,06 \text{ m/s}.$ 140 Figura 8.21 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sq}=20 \text{ m/s} \text{ e D}=15,8 \text{mm}.$ 143 Figura 8.22 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sq}=24 \text{ m/s} \text{ e D}=15,8 \text{mm}.$ 143 Figura 8.23 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=28 m/s e D=15,8mm$. 144 Figura 8.24 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido

para <i>U_{sg}=</i> 34 m/s e D=15,8mm.	144
Figura 8.25 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para	
<i>U_{s/}=0,056 m/</i> s e D=15,8mm.	145
Figura 8.26 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para	
<i>U_{s/}=0,084 m/</i> s e D=15,8mm.	145
Figura 8.27 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para	
<i>U_{s/}=0,112 m/</i> s e D=15,8mm.	146
Figura 8.28 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para	
<i>U_{s/}=0,140 m/</i> s e D=15,8mm.	146
Figura 8.29 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido	
para <i>U_{sg}=25 m/</i> s e D=50,8mm.	147
Figura 8.30 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido	
para <i>U_{sg}=30 m/</i> s e D=50,8mm.	147
Figura 8.31 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido	
para <i>U_{sg}=35 m/</i> s e D=50,8mm.	148
Figura 8.32 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para	
<i>U_{s/}=0,01 m/</i> s e D=50,8mm.	148
Figura 8.33 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para	
<i>U_{s/}=0,03 m/</i> s e D=50,8mm.	149
Figura 8.34 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para	
<i>U_{s/}=0,06 m/</i> s e D=50,8mm.	149
Figura 8.35 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme	
em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para	
<i>U_{s/}=0,1 m</i> ∕s e D=50,8mm.	150
Figura 8.36 - Frequências dominantes para diferentes velocidades	
superficiais de gás para a seção de 15,8 mm.	150

Figura 8.37 - Frequências dominantes para diferentes velocidades	
superficiais de gás para a seção de 50,8 mm.	151
Figura 8.38 - Frequências dominantes para diferentes velocidades	
superficiais de líquido. para a seção de 50,8 mm.	151
Figura 8.39 - Histograma da espessura de filme líquido para U_{sg} =20 m/s e	
U_{sf} =0,112 para a seção de 15,8 mm.	152
Figura 8.40 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=20 \text{ m/s}$ e D=15,8	
mm.	153
Figura 8.41 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=24$ m/s e D=15,8	
mm.	153
Figura 8.42 - Histograma da espessura do filme para U_{sg} =28 m/s e D=15,8	
mm.	154
Figura 8.43 - Histograma da espessura do filme para U_{sg} =34 m/s e D=15,8	
mm.	154
Figura 8.44 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,056$ m/s e	
D=15,8 mm.	154
Figura 8.45 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,084$ m/s e	
D=15,8 mm.	155
Figura 8.46 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,112$ m/s e	455
D=15,8 mm.	155
Figura 8.47 - Histograma da espessura do hime de para $U_{s} = 0, 140 \text{ m/s}$ e	155
D=13,0 mm.	100
rigura 0.40 - histograma da espessura do nime para $O_{sg}=20$ m/s e D=50,0	156
Figure 8.49 - Histograma da espessura do filme para $II = 30 m/s$ e D=50.8	150
mm	156
Figura 8.50 - Histograma da espessura do filme para $U_{m}=35 m/s$ e D=50.8	
mm.	156
Figura 8.51- Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0.01 \text{ m/s}$ e D=50.8	
mm.	157
Figura 8.52- Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0.03$ m/s e D=50.8	
mm.	157
Figura 8.53- Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,06$ m/s e D=50,8	
mm.	157
Figura 8.54 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,1$ m/s e D=50,8	
mm.	158

Figura 8.55 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sl}=0,140 \text{ m/s}$ e $U_{sg}=20 \text{ m/s}$	
para a seção com 15,8 mm de diâmetro interno.	160
Figura 8.56 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sl}=0,140 \text{ m/s}$ e $U_{sg}=20 \text{ m/s}$	
para a seção com 15,8 mm de diâmetro interno	160
Figura 8.57 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,1$ m/s e $U_{sg}=30$ m/s para	
a seção com 50,8 mm de diâmetro interno.	161
Figura 8.58 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,1$ m/s e $U_{sg}=30$ m/s para	
a seção com 50,8 mm de diâmetro interno	161
Figura 8.59 - Sequência de magens da seção transversal do escoamento	
do filme de líquido durante a passagem de uma grande onda para U_{sg} =20	
m/s e <i>U_{s/}</i> = 0.140 m/s.	162
Figura 8.60 - Imagens da distribuição de filme de líquido ao longo da seção	
transversal (a) U_{sg} =20 m/s e U_{sf} = 0,112 (b) U_{sg} =34 m/s e U_{sf} =.0,112.	163
Figura 8.61 – Medição da espessura instantânea de filme ao longo da	
circunferência do tubo (a) a cada 5º e (b) a cada 1º e ajustadas por uma	
curva.	164
Figura 8.62 - Comparação do espectro de frequências do sinal de	
espessura de filme de líquido na geratriz inferior do tubo, obtido pelas	
técnicas longitudinal e transversal, para U_{sg} =20 m/s e U_{sl} =0.140 m/s.	166
Figura A.1 - Curva de calibração do rotâmetro contra a placa de orifício.	176

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Incerteza do rotâmetro de liquido da marca CONAUT modelo	
440RN15 utilizado nos experimentos.	58
Tabela 5.1 - Configurações ópticas utilizadas cada caso estudado.	83
Tabela 6.1 - Configurações ópticas utilizadas cada caso estudado.	110
Tabela 8.1 - Matriz de testes conduzidos na seção de 15,8 mm de	
diâmetro.	127
Tabela 8.2 - Matriz de testes conduzidos na seção de 50,8 mm de	
diâmetro.	127
Tabela 8.3 – Distância entre as sondas de medição para cada	
configuração estudada.	137
Tabela B.1 - Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na	
estimativa na incerteza na medida da espessura instantânea de filme de	
líquido.	180
Tabela B.2 - Incerteza relativa na medição de espessura média de filme	
líquido para todos os casos estudados na seção de 15,8 mm.	182
Tabela B.3 - Incerteza relativa na medição de espessura média de filme	
líquido para todos os casos estudados na seção de 50,8 mm.	182
Tabela B.4 - Incerteza relativa no cálculo de espessura de filme líquido	
para todos os casos estudados na seção de 15,8 mm.	185
Tabela B.5 - Incerteza relativa no cálculo de espessura de filme líquido	
para todos os casos estudados na seção de 50,8 mm.	185

Lista de Variáveis

Letras Latinas

b - Valor da abscissa do centro da curva sigmóide usada na equalização do histograma

c - Fator de calibração (pixel/mm)

D - Diâmetro interno da tubulação (mm)

 $d_{\rm s}$ - Distância axial entre as sondas (mm)

 δh_{flut} - Incerteza na flutuação do sinal de espessura do filme (mm)

 $\delta h_{técnica}$ - Incerteza da técnica de medição em cada valor instantâneo da espessura de filme (mm)

f - Frequência de aquisição das imagens (Hz)

h(*t*) - Espessura instantânea de filme de líquido (mm)

h^p - Espessura de filme (*pixels*)

h - Espessura média do filme de líquido (mm)

 h_{RMS} - Valos médio quadrático da espessura do filme de líquido (mm)

 h_i - Valor medido para a espessura de filme na imagem *i* (mm)

 h_i^* - Valor da espessura de filme alterado por um pequeno fator (mm)

I - Intensidade de cinza de cada pixel da imagem original

I_{max} - Intensidade máxima de cinza dos *pixels* da coluna

I_{max}-* Intensidade máxima de cinza dos *pixels* da coluna após a aplicação do filtro de mínimo das intensidades máximas

*I_{max}**-* Intensidade máxima de cinza dos *pixels* da coluna após a aplicação do filtro de média das intensidades máximas

 I_{med} - Média das intensidades de cinza dos *pixels* da coluna ponderada pelo parâmetro *b* escolhido

Imin - Intensidade mínima dos pixels da coluna

ly - Intensidade de cinza do pixel após a aplicação da curva sigmóide

Iy_{norm} - Intensidade de cinza do *pixel* após a normalização da curva sigmóide

*l*_s- Largura das sondas de medição

Liminf - Valor mínimo de intensidade de cinza dos pixels

Limsup - Valor máximo de intensidade de cinza dos pixels

Lim_{med} - Valor médio de intensidade de cinza dos pixels

 L^{p} - Distância entre as duas sondas de medição (*pixels*)

 \dot{m}_{sg} - Vazão mássica de gás (kg/s)

 \dot{m}_{sl} - Vazão mássica de líquido (kg/s)

N - Número de imagens em um dado experimento

 n^{q} - Número de quadros calculado pela correlação cruzada entre os sinais de espessura de filme

Q_{real}^{cal} - Vazão de gás real nas condições de calibração (m³/h)

Q_{rot}^{cal} - Vazão de gás medida no rotâmetro nas condições de calibração (m³/h)

Q_{rot}^{op} - Vazão lida no rotâmetro nas condições de operação (m³/h)

U_{sg} - Velocidade superficial do gás (m/s)

 U_{sl} - Velocidade superficial do líquido (m/s)

v - Velocidade de propagação das ondas de líquido (m/s)

x - Título

 Y'_{p} - Coordenada de um ponto formado pela interseção das linhas da malha do alvo de calibração (*pixels*)

 Y_{p}^{2} - Coordenada de um ponto formado pela interseção das linhas da malha do alvo de calibração (*pixels*)

y^{*p*} - Posição da interface detectada automaticamente pela rotina de processamento de imagens (*pixels*)

 y_w^p - Posição da parede interna do tubo determinada manualmente pelo usuário (*pixels*)

Letras gregas

- α Inclinação da curva sigmóide usada na equalização do histograma
- δ Incerteza na medição da grandeza
- ρ_1 Massa específica do líquido (kg/m³)
- ho_g Massa específica do gás (kg/m³)
- ρ_{real}^{cal} Massa específica do gás nas condições de calibração (kg/m³)
- ρ_{rot}^{cal} Massa específica do gás nas condições de operação (kg/m³)
- σ Desvio padrão da espessura do filme de líquido (mm)
- φ Fator de expansão da curva sigmoide

Superescritos

- cal Nas condições de calibração
- op Nas condições de operação
- p Medido em pixels
- s1 Referente à sonda 1
- s2 Referente à sonda 2

Subscritos

inf - Inferior max - Máximo med - Médio min - Mínimo sg - Superficial de gás sl - Superficial de líquido sup - Superior

Siglas

- CMOS Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
- FEP Fluorinated Ethylene Propylene
- FFT Fast Fourier Transform
- PIV Particle Image Velocimetry
- PLIF Planar Laser-Induced Fluorescence
- PSD Power Spectral Density
- RANSAC Random Sample Consensus
- RMS Root Mean Square
- YLF Yttrium Lithium Fluoride
- ASME American Society of Mechanical Engineering

1 Introdução

Escoamentos bifásicos de líquido e gás através de tubulações são frequentemente encontrados na indústria. Este tipo de escoamento ocorre, por exemplo, nas áreas de processamento químico, de geração de energia, de produção de petróleo e de refrigeração. O conhecimento das propriedades relacionadas aos escoamentos bifásicos é fundamental para o projeto e correta operação das tubulações e equipamentos envolvidos na movimentação dos fluidos.

Os arranjos geométricos das interfaces entre os fluidos no escoamento gás-líquido apresentam diferentes configurações quando as duas fases escoam juntas dentro de uma mesma tubulação. Estas configurações dependem das condições de operação (vazão, pressão, temperatura), da geometria da tubulação (dimensão, inclinação) e das propriedades dos fluidos (densidade, viscosidade e tensão interfacial). A combinação destas características determina o regime de escoamento.

Os padrões de escoamento bifásico em dutos horizontais tendem a ser ainda mais complexos devido à assimetria causada pela ação da gravidade. Os padrões de escoamento bifásico observados em tubulações horizontais (Taitel & Dukler, 1976) são apresentados na Figura 1.1 e descritos brevemente a seguir.

Padrão de Bolhas:

Para vazões muito altas de líquido, a fase gasosa é distribuída na forma de bolhas discretas no interior de uma fase líquida contínua, com a tendência de aglomerarem-se na parte superior da tubulação devido aos efeitos gravitacionais. As fases movem-se com a mesma velocidade e o escoamento é considerado homogêneo sem escorregamento.

<u>Padrão Estratificado</u>:

Este padrão de escoamento acontece para velocidades superficiais de gás e líquido relativamente baixas. As duas fases são separadas devido à ação da gravidade, com o líquido escoando na parte inferior enquanto o gás ocupa a parte superior do tubo.

Padrão Ondulado:

Com o aumento da velocidade superficial da fase gasosa no escoamento estratificado, ondas são formadas na interface de separação líquido-gás, gerando o regime ondulado.

Padrão de Golfadas:

Este padrão é caracterizado pelo escoamento alternado de líquido e gás. Pistões de líquido, que ocupam todo o diâmetro do tubo são separados por bolhas de gás, que se movem sobre um filme de líquido presente na parte inferior do tubo. Para altas vazões de gás, o pistão de líquido se apresenta aerado por pequenas bolhas, as quais se concentram na frente do pistão e na parte superior da tubulação.

• Padrão de bolhas alongadas:

Com o aumento da velocidade da fase gasosa no escoamento no padrão de bolhas há coalescência das bolhas. Estas ficam alongadas em forma de balas, que tendem a escoar no topo da tubulação devido ao efeito da gravidade.

<u>Padrão anular</u>:

Este padrão de escoamento ocorre para velocidades superficiais de gás elevadas. A fase gasosa concentra-se na parte central enquanto a fase líquida escoa em forma de um filme na parede do duto. A interface entre o filme líquido e o núcleo de gás é dinâmica, apresentando um perfil ondulatório. Altas vazões de gás podem acarretar o arrancamento de pequenas gotículas de líquido do filme, as quais entranham-se na fase gasosa e são carregadas no núcleo de gás. Devido ao efeito da gravidade, a espessura do filme na parte inferior é maior que no topo, dependendo das vazões relativas de gás e de líquido. Para baixas razões de vazão gás e líquido, a maior parte do líquido concentra-se na parte inferior do duto, enquanto ondas estáveis de líquido cobrem a superfície restante, eventualmente molhando a parte superior do tubo.



Figura 1.1 - Escoamento bifásico em dutos horizontais (Tong & Tang, 1997).

Existem diversos trabalhos na literatura, realizados ao longo dos anos, dedicados à proposição de mapas de padrões de escoamento onde procura-se associar os regimes de escoamentos bifásico a parâmetros globais do escoamento, como vazões das fases ou outros parâmetros que incluem a vazão das fases. As transições de fases entre os diferentes regimes são reconhecidamente um problema complexo governado por diversas grandezas que controlam o escoamento e a interação entre as fases. A tentativa de caracterizar as regiões de ocorrência de determinados padrões de escoamento e suas transições com um par de parâmetros, resulta em mapas de validade restrita às condições experimentais para as quais os dados foram gerados. De qualquer modo, mapas de padrão de escoamento são úteis e largamente empregados na caracterização de escoamentos bifásicos.

A Figura 1.2 e a Figura 1.3 apresentam exemplos de dois mapas de padrões para escoamentos bifásicos de ar e água em tubos horizontais e verticais, respectivamente.



Figura 1.2 - Mapa de padrão de escoamento horizontal ar-água para tubulação com 25 mm de diâmetro interno a 25°C e 1 bar (Mandhane et al., 1974). A linha contínua delimita as transições a partir de observações experimentais e as regiões hachuradas representam previsões teóricas.



Figura 1.3 - Mapa de padrão de escoamento vertical ar-água para tubulação com 32 mm de diâmetro interno (Hewitt & Roberts, 1969).

Dentre os diversos padrões observados nas figuras anteriores, o padrão de escoamento anular apresenta uma complexidade intrigante em sua modelagem – o entendimento dos mecanismos responsáveis pela distribuição do filme de líquido ao longo da circunferência do tubo. Trata-se de uma questão ainda aberta na literatura, como será comentado no próximo capítulo, e de grande relevância para a correta modelagem deste escoamento.

Além do interesse básico que despertam os escoamentos bifásicos horizontais de líquido e gás no regime anular, eles são encontrados em diversas aplicações práticas relevantes, como em evaporadores de sistemas de refrigeração, linhas de produção de petróleo, linhas de transporte de gás e aplicações em plantas químicas.

O presente trabalho, por exemplo, foi motivado por uma aplicação oriunda de um processo petroquímico onde gás e líquido corrosivos escoam no regime anular por tubos horizontais. Na operação de campo constataram-se taxas de corrosão dos tubos muito acima dos valores esperados, levando à perda acelerada das tubulações. Uma das hipóteses consideradas para explicar o problema está relacionada a alterações impostas no filme de líquido, característico do escoamento anular. Estas alterações seriam causadas por acidentes presentes na tubulação, como curvas ou cordões de solda, que poderiam vir a destruir o filme provocando aumento de temperatura na parede do tubo e consequente aumento da taxa de corrosão.

O presente trabalho é parte de um projeto de pesquisa em andamento no Laboratório de Engenharia de Fluidos do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio que tem como principal objetivo contribuir para a melhor compreensão dos mecanismos físicos que controlam o comportamento dinâmico do escoamento bifásico horizontal de ar e água em regime anular. Como será apresentado em detalhes ao longo do texto, o trabalho desenvolveu e utilizou técnicas ópticas para produzir informações qualitativas e quantitativas sobre a estrutura dinâmica do filme de líquido característico do escoamento anular.

31

1.1. Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em dez capítulos. No Capítulo 2 será apresentada uma breve descrição das caraterísticas do escoamento anular, incluindo uma revisão bibliográfica da literatura sobre trabalhos experimentais realizados sobre este assunto.

O Capítulo 3 dedica-se à descrição das técnicas ópticas utilizadas para captura das imagens. No Capítulo 4, a montagem das duas seções de testes projetadas e os equipamentos utilizados são apresentados.

Nos Capítulos 5 e 6 são apresentados os procedimentos experimentais adotados para calibração, captura e processamento das imagens longitudinais e transversais, respectivamente.

O Capítulo 7 apresenta a descrição do procedimento adotado para extração dos dados quantitativos do filme líquido.

No Capítulo 8 os resultados experimentais obtidos são apresentados e comentados e, no Capítulo 9, são expostas as conclusões do trabalho. O Capítulo 10 reúne as referências bibliográficas utilizadas no estudo.

2 Revisão Bibliográfica

No escoamento bifásico anular horizontal, o líquido escoa sob forma de um filme não uniforme de pequena espessura, que reveste a parede do tubo. O núcleo gasoso é turbulento devido às altas vazões mássicas de gás características deste escoamento. Altas vazões de gás causam o arrancamento de pequenas gotículas de líquido do filme, as quais são entranhadas na fase gasosa, contribuindo para o transporte global do líquido. A interface entre o filme líquido e o núcleo de gás é dinâmica, apresentando uma topografia irregular, devido ao forte cisalhamento existente entre as fases.

Dois tipos de perturbações presentes na interface entre o filme de líquido e o núcleo de gás afetam fortemente os processos de transporte entre as fases, e a dinâmica do escoamento anular. A primeira consiste de pequenas perturbações, *ripples*, cujas características principais são a baixa amplitude, pequeno comprimento e alta frequência, que surgem com baixa velocidade continuamente na superfície do filme de líquido. O segundo tipo de perturbação é caracterizado por grandes ondas, *disturbance waves*, que apresentam grandes amplitudes e comprimentos, além de apresentarem-se com menor frequência e movendo-se com velocidade superior à da superfície do filme base. A amplitude destas grandes ondas pode ser várias vezes maior que a espessura do filme líquido base, carregando ativamente massa de líquido no sentido do escoamento.

A literatura sobre escoamento bifásico anular horizontal é composta por diversos estudos que vêm sendo realizados ao longo de décadas de pesquisas. Esse interesse continuado é, provavelmente, sinal da relevância e complexidade deste tipo de escoamento. Dentre a relação de parâmetros de interesse para estudos científicos sobre este padrão de escoamento, destacam-se as taxas de entranhamento de líquido no núcleo de gás, a transferência de massa de líquido para a fase gasosa, a tensão cisalhante na parede, a perda de carga ao longo da tubulação, distribuição de espessura do filme de líquido, a velocidade local das fases, e a frequência e velocidade das ondas.

2.1. Mecanismos de Redistribuição do Filme de Líquido

Na literatura observa-se não haver ainda um consenso sobre os mecanismos responsáveis pela distribuição do líquido ao longo da circunferência do tubo e, em particular, sobre os principais mecanismos que mantêm o filme na parede superior do tubo, compensando a drenagem causada pela gravidade. A maioria dos trabalhos encontrados na literatura apresenta como possível explicação para a redistribuição circunferencial do filme de líquido um, ou uma combinação, dos mecanismos descritos a seguir.

<u>Escoamento secundário no núcleo gasoso</u>

Pletcher & McManus (1965) propuseram um mecanismo baseado no arraste na direção circunferencial produzido sobre o filme de líquido pelo escoamento secundário de gás presente no tubo. Segundo os autores, este escoamento secundário de gás seria induzido pela não uniformidade da rugosidade interfacial na direção circunferencial. A não uniformidade na rugosidade é relacionada com a não uniformidade na espessura do filme de líquido ao longo da circunferência do tubo. Os trabalhos de Laurinat *et al.* (1985) e Lin *et al.* (1985) mostram que o escoamento secundário no gás contribui para a distribuição do filme de líquido. Belt (2007) inclui também a não uniformidade na concentração das gotas de líquido entranhadas no núcleo gasoso como um fator adicional indutor do escoamento secundário. A Figura 2.1, retirada do trabalho de Belt (2007), apresenta uma representação esquemática do mecanismo descrito.



Figura 2.1 - Representação esquemática para o mecanismo de escoamento secundário de gás, possivelmente responsável pela redistribuição do filme de líquido (figura retirada de Belt, 2007).

Mecanismo de espalhamento do filme pela passagem da onda

Butterworth & Pulling (1972) propuseram o mecanismo de redistribuição do filme de líquido (wave spreading) baseado na suposição de que as ondas de grande amplitude, apesar de circunferencialmente coerentes, deslocam-se de modo inclinado devido às suas maiores velocidades na parte inferior do tubo. Estas maiores velocidades de deslocamento estariam relacionadas com as maiores espessuras do filme de líquido nesta posição no tubo. A tensão cisalhante interfacial promovida pelo escoamento do gás sobre a onda distorcida apresentaria, segundo os autores, uma componente na direção circunferencial que seria a responsável pelo movimento ascendente do líquido ao longo da circunferência do tubo. É importante ressaltar o comentário de Belt (2007) indicando que em seus experimentos nem sempre foram observadas ondas distorcidas. Este autor menciona ainda que no próprio trabalho onde foi proposto o mecanismo de espalhamento da onda, Butterworth & Pulling (1972) também mencionam a presença de ondas não distorcidas. Assim, a relevância deste mecanismo pode ser questionada. A Figura 2.2 apresenta de maneira esquemática o mecanismo descrito.



Figura 2.2 - Representação esquemática do mecanismo de espalhamento do filme de líquido pela passagem da onda (figura retirada de Kopplin, 2004).

Mecanismo de bombeamento pelas ondas

Este mecanismo, conhecido na literatura como *wave pumping,* foi proposto por Fukano & Ousaka (1989). Trata-se de um mecanismo onde o líquido é bombeado para a parte superior do tubo pelo interior da onda, sem que seja necessária a hipótese de distorção da onda. De acordo com os autores, o escoamento do gás sobre uma onda de espessura variável a longo de sua circunferência induziria um gradiente de pressão

também não uniforme circunferencialmente. Esta diferença de pressão induziria o escoamento ascendente de líquido. Para Fukano & Ousaka (1989), as ondas são o fator principal para formar e manter o filme líquido na parte superior do tubo. Entretanto, entre a passagem das ondas, o filme líquido drena continuamente para baixo devido à ação da gravidade. A Figura 2.3, retirada do trabalho de Kopplin (2004) ilustra o mecanismo de bombeamento de líquido descrito.



Figura 2.3 – Representação esquemática do mecanismo de bombeamentopelas ondas (figura retirada de Kopplin, 2004).

Mecanismo de entranhamento e deposição de gotas

A interação do escoamento do gás com a crista das ondas de líquido pode acarretar no arrancamento de gotas que seriam entranhadas na corrente de gás e, eventualmente, reincorporadas ao filme de líquido em uma posição a jusante do ponto de arrancamento, contribuindo para a manutenção do filme superior de líquido. Este mecanismo foi proposto inicialmente por Russel & Lamb (1965).

Como mencionado por Belt (2007), diversos trabalhos disponíveis na literatura apresentam boa concordância com experimentos no que diz respeito à previsão da distribuição circunferencial da espessura do filme, apesar de serem baseados em mecanismos distintos de redistribuição do filme de líquido, como os apresentados acima. Esta constatação é uma indicação que os fundamentos que governam este escoamento ainda não são complementamente entendidos e que, combinações de mais de um destes mecanismos podem prevalecer dependo dos parâmetros globais que controlam o escoamento ou mesmo da configuração geométrica.

Recentemente, Oliveira & Portela (2010) demonstraram através de experimentos numéricos com configurações de filme de líquido idealizadas, que
gradientes axiais da tensão cisalhante interfacial podem induzir tensões interfaciais na direção circunferencial. Estas tensões seriam responsáveis pela manutenção do filme de líquido superior, contrabalançando o efeito gravitacional. Trata-se, portanto, de mais um modelo para explicar a redistribuição do filme de líquido, o que corrobora a afirmação feita anteriormente que ainda não há consenso sobre a física que governa este escoamento.

2.2. Estudos Experimentais em Escoamentos Anulares

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver técnicas experimentais que permitam extrair dados qualitativos e quantitativos sobre a estrutura do escoamento anular, e que auxiliem no entendimento dos mecanismos que governam este padrão de escoamento bifásico. Portanto, nesta seção serão apresentados os principais trabalhos experimentais disponíveis na literatura que têm como objetivo o estudo da estrutura do escoamento bifásico anular. O foco destes trabalhos foi a caracterização do filme de líquido, através da medição da variação temporal da espessura do filme, da distribuição de frequências e velocidades das grandes ondas.

Técnicas de visualização de escoamentos têm sido amplamente utilizadas como ferramentas para auxiliar na caracterização do comportamento transiente do filme de líquido. A leitura dos trabalhos disponíveis em ordem cronológica mostra que as diferentes técnicas de visualização utilizadas acompanharam, ao longo dos anos, o desenvolvimento das tecnologias disponíveis para a captura de imagens.

Taylor & Nedderman (1968) e Butterworth & Pulling (1972) usaram cinematografia de alta velocidade com iluminação externa contínua e com injeção de corante no escoamento. Mais tarde, sistemas de vídeo de alta frequência de captura de imagens foram usados por Hewitt *et al.* (1990), substituindo os sistemas baseados em filmes químicos, que demandavam muito tempo de processamento.

A técnica de ativação fotocrômica de corante foi usada para gerar traçadores no filme líquido, cujo movimento era registrado por câmeras de alta velocidade com iluminação de fundo (Sutharshan et al., 1995). A análise das imagens digitais capturadas gerou informações qualitativas relevantes sobre os efeitos da passagem de onda nas velocidades axial e radial do filme de líquido.

A espessura média típica do filme de líquido em escoamentos anulares varia de alguns micrômetros a poucos milímetros. A visualização de dimensões tão pequenas nas vizinhanças de uma parede sólida é um desafio para técnicas ópticas. Hewitt et al. (1990) usaram um tubo constituído de *FEP*, *Fluorinated Ethylene Propylene*, um material que apresenta um índice de refração praticamente igual ao da água, o que minimizou as distorções nas imagens nas regiões próximas à parede do tubo.

Shedd & Newell (1998) determinaram a variação temporal da espessura do filme de líquido utilizando uma técnica baseada no princípio da reflexão total da luz proveniente de um LED posicionado na superfície externa do tubo e emitindo luz em direção à interface líquido-gás. A reflexão da luz era capturada por uma câmera digital, sendo o afastamento lateral dos raios refletidos convertido em espessura de filme de líquido através de um processo de calibração. Esta técnica tem sido usada com sucesso pelo mesmo grupo de pesquisadores em trabalhos onde as características das ondas de líquido são analisadas e correlacionadas com as vazões das fases (Schubring & Shedd, 2008, 2009a e 2009b).

Rodríguez & Shedd (2004) empregaram uma técnica de fluorescência planar induzida a laser (*Planar Laser Induced Fluorescence - PLIF*) como método de separação da luz emitida pelo líquido daquela muito mais intensa refletida pela interface gás-líquido. Filtros ópticos posicionados à frente da câmera digital permitiam apenas a passagem da luz proveniente do material fluorescente dissolvido no líquido. Neste trabalho, os autores estudaram o escoamento horizontal anular bifásico ar-água com o objetivo de obter imagens do filme líquido e observar o comportamento das ondas interfaciais na circunferência da tubulação. Esta foi uma das técnicas utilizadas no presente trabalho, e será descrita com mais detalhes no Capítulo 3.

Uma interessante técnica baseada na fluorescência induzida por plano de laser foi recentemente utilizada por pesquisadores russos (Alekseenko et al., 2008, 2009a, 2009b e 2010). Na técnica, um plano de luz laser contínua de intensidade não necessariamente elevada, cerca de 50 mW, ilumina uma seção longitudinal do escoamento anular. O líquido é uma solução de água e rodamina, a substância fluorescente. Uma câmera digital registra o sinal de fluorescência emitido pela porção do filme de líquido iluminado pelo plano laser. Ao contrário de outras técnicas de fluorescência, como a proposta no presente trabalho, onde uma imagem instantânea do filme de líquido é capturada em cada quadro, nesta técnica captura-se apenas o nível de intensidade do sinal de fluorescência. Este

sinal é então posteriormente relacionado com a espessura instantânea do filme através de um procedimento de calibração estático. A câmera digital empregada é uma câmera linear de alta frequência de captura. Esta câmera é formada por uma única linha de 1024 sensores de imagem do tipo CMOS. Assim, sua resolução espacial é de 1024x1 *pixels*. Cada *pixel* do sensor da câmera oferece uma faixa dinâmica de 10 bits, ou seja, o sinal de intensidade de fluorescência correspondendo à espessura do filme podia ser discretizado em 1024 intervalos, fornecendo boa resolução na altura do filme. Os resultados obtidos pelos pesquisadores com esta técnica sobre a interação das pequenas e grandes ondas de líquido no escoamento anular são bastante interessantes.

A pesquisa bibliográfica revelou apenas um trabalho onde técnicas ópticas foram utilizadas para medir o perfil instantâneo de velocidade no filme de líquido. Trata-se do trabalho de Kopplin (2004) onde a velocimetria por imagem de partículas (*Particle Image Velocimetry – PIV*) e por acompanhamento de partículas (*Particle Tracking Velocimetry – PTV*) foram adaptadas para permitir a medição nas pequenas espessuras típicas do filme de líquido. A leitura do trabalho, no entanto, mostra que os resultados obtidos não foram satisfatórios.

Como foi apresentado nesta breve revisão, as técnicas ópticas evoluíram de um estágio onde forneciam apenas informações qualitativas sobre o escoamentos para a produção de resultados quantitativos de boa exatidão. No entanto, a maior parte dos trabalhos publicados na literatura sobre a estrutura do escoamento anular bifásico foi obtida por meio de sondas pontuais baseadas em princípios elétricos. A seguir é apresentada uma breve revisão dos principais trabalhos que utilizaram técnicas elétricas no estudo de escoamentos bifásicos anulares. O objetivo da descrição é mencionar o tipo de técnica empregada em cada trabalho e não os resultados físicos obtidos. Estes, quando considerados pertinentes, serão comentados no Capítulo 8, onde os resultados obtidos no presente trabalho são apresentados e discutidos.

Apesar de técnicas elétricas incluírem sensores capacitivos e condutivos, a pesquisa bibliográfica realizada revelou estudos relacionados a escoamentos anulares horizontais empregando apenas sondas condutivas. As sondas condutivas funcionam baseadas na diferença entre as resistividades do líquido e do gás. Dois eletrodos são posicionados no escoamento e alimentados por uma fonte, normalmente, de corrente alternada. A voltagem gerada pela sonda condutiva é registrada, assim como a condutância do fluido naquela posição. Esta condutância pode ser relacionada à espessura do filme por um processo de calibração. A resposta destas sondas pode atingir alguns kHz e as diversas

configurações implementadas diferem na forma e dimensões dos eletrodos. Normalmente, sondas de fios paralelos posicionados dentro do tubo são mais adequadas para a medição de filmes com maior espessura. Para filmes mais finos, eletrodos montados rente à superfície interna do tubo dão bons resultados.

Russel & Lamb (1965), aparentemente, realizaram o primeiro trabalho utilizando sondas condutivas para a medição da espessura de filme de líquido no escoamento anular horizontal. A sonda condutiva era formada por um fio fino montado em uma sonda radial ligada a um eletrodo montado rente à parede interna do tubo. Uma solução salina era injetada por uma seringa em uma posição a montante da posição da sonda condutiva aumentando a condutividade elétrica do líquido e, portanto, a resposta da sonda. Diversos outros trabalhos utilizando sondas condutivas foram realizados utilizando sondas com geometrias similares (Coney, 1973, Brown et al., 1978, Zabaras et al., 1986).

Fukano et al. (1983 e 1989) utilizaram uma sonda condutiva, alimentada por fonte de corrente contínua, onde um dos eletrodos era formado por uma agulha fina de platina enquanto o segundo eletrodo era montado na superfície interna do tubo. Laurinat et al. (1985) empregaram 8 sondas com dois fios paralelos imersos no filme de líquido montados a 45°, associados a sondas montadas na superfície. Jayanti et al. (1990) e Paras & Karabelas (1991) utilizaram sondas de dois fios para determinar as propriedades estatísticas e espectrais do filme de líquido. Várias sondas foram distribuídas ao longo da circunferência do tudo em duas posições axiais. Desta forma foi possível correlacionar os sinais de duas sondas com mesma posição angular para determinar a velocidade de propagação das ondas no filme. Geraci et al. (2007) aplicaram técnica semelhante no estudo do escoamento anular vertical.

Um grande avanço na medição das características dinâmicas de filmes de líquido em escoamento bifásico anular foi apresentado no trabalho de Belt et al. (2010). Esta técnica é uma adaptação da técnica intrusiva baseada na medição da condutividade entre grupos de fios formando uma matriz de sensores. Esta técnica tem sido muito utilizada em diversos estudos de escoamentos bifásicos, sendo conhecida pelo nome em inglês *wire mesh* (Prasser, 1998). Sua principal característica é a capacidade de medição em múltiplas posições simultaneamente. Para a utilização em escoamentos anulares, os autores criaram uma nova concepção da técnica onde os sensores são montados rente às paredes, alternando grupos de eletrodos circulares de pequenas dimensões com eletrodos na forma de anéis. Ao todo, 320 eletrodos sensores foram utilizados, 32 eletrodos distribuídos na circunferência do tubo, em 10 diferentes

posições axiais. A leitura de todos os eletrodos é feita por um circuito eletrônico que tipicamente completa um ciclo de aquisição de valores de espessura de filme nos 320 pontos de leitura em cerca de 0,2 ms. Aparentemente, tecnologias baseadas no conceito de *wire mesh* serão dominantes nos próximos anos, no que diz respeito a sondas elétricas.

Para finalizar esta revisão, cabe mencionar o trabalho de Vassalo (1999) utilizando sondas elétricas do tipo fio quente, no estudo dos perfis de velocidade dentro do filme de líquido de escoamento bifásico anular vertical.

Como pode ser observado na breve revisão apresentada sobre as técnicas de medição descritas na literatura, a maior parte das informações disponíveis sobre o comportamento dinâmico do escoamento anular foi obtida a partir de sondas resistivas. Estas sondas fornecem informações em um número reduzido de posições no escoamento, sendo, em sua maioria, posicionadas no interior do escoamento, potencialmente interferindo nos resultados.

Técnicas ópticas, por outro lado, têm sido muito menos empregadas em experimentos que buscam resultados quantitaivos. Sua natureza não intrusiva, aliada à capacidade de fornecer informações instantâneas em regiões extensas do escoamento com excelentes resoluções espaciais e temporais são fatores que apontam para uma popularização destas técnicas no futuro próximo. Contribuindo para a consolidação das técnicas ópticas, pode-se citar a constante e rápida evolução observada no desempenho das fontes de iluminação, das câmeras para aquisição de imagens, assim como na capacidade de processamento dos computadores, equipamentos de cujo desempenho depende a qualidade e alcance das medidas a serem obtidas com técnicas de visualização. Como limitação óbvia desta classe de técnicas, deve-se mencionar a necessidade de acesso óptico ao escoamento.

O presente trabalho teve como objetivo contribuir para o desenvolvimento de técnicas ópticas aplicadas a escoamentos bifásicos gás-líquido. Apesar dos desenvolvimentos terem sido direcionados para o estudo do escoamento horizontal ar-água em regime anular, a técnica desenvolvida pode ser aplicada a outros padrões de escoamento. Uma característica marcante da técnica óptica desenvolvida é a disponibilização simultânea de informações quantitativas com bom nível de incerteza experimental, e de imagens de visualização qualitativa de alta qualidade, o que contribui para o entedimento dos fenômeos físicos envolvidos no escoamento.

41

3 Técnicas Ópticas de Visualização Utilizadas

As técnicas disponíveis para visualização de escoamentos desenvolveramse significativamente nos últimos anos. A disponibilidade de lasers contínuos com elevada potência, e de lasers pulsados de alta energia e com taxas de repetição cada vez mais altas tem possibilitado a iluminação adequada para os escoamentos de interesse acadêmico e industrial. Aliado a isto, a evolução constante das câmeras digitais e da capacidade de processamento das imagens têm permitido a captura e análise de escoamentos cada vez mais complexos.

Algumas configurações, no entanto, apresentam complicadores que dificultam ou mesmo inviabilizam a utilização de técnicas de visualização. Dentre estas encontram-se os escoamentos com mais de uma fase, onde a variação do índice de refração dos fluidos em escoamento provoca o espalhamento da luz nas interfaces. A visualização de escoamentos bifásicos de ar e água em regime anular, em particular, apresenta a dificuldade adicional da existência do filme de líquido junto à parede, o que promove o espalhamento da luz incidente dificultando a visualização da interface interna ar-água.

Técnicas de medição baseadas na visualização quantitativa do escoamento são fontes riquíssimas de dados experimentais que podem ser usados para um melhor entendimento dos fenômenos físicos envolvidos. Essas técnicas têm sido amplamente aplicadas a escoamentos monofásicos, sendo aqui nosso principal objetivo estendê-las para aplicações em escoamentos bifásicos.

Esse trabalho tem como foco o estudo do escoamento anular em tubos horizontais. O objetivo da técnica desenvolvida é fornecer informações que permitam a completa caracterização estatística do filme de líquido através de, por exemplo, valores médios e *RMS* da espessura do filme, velocidade e espectro de frequência das ondas.

Neste capítulo serão descritas as técnicas ópticas e as montagens utilizadas para as visualizações transversais e longitudinais do escoamento do filme de líquido. No Capítulo 4 serão descritos os detalhes técnicos dos equipamentos utilizados e nos capítulos 5 e 6 os procedimentos para a condução dos experimentos serão apresentados.

3.1. Fluorescência Planar Induzida por Laser

Como já mencionado, a principal dificuldade na visualização de escoamentos bifásicos gás-líquido origina-se no intenso espalhamento da luz incidente nas interfaces. Uma solução para contornar este problema é a separação da luz espalhada na interface daquela emitida pelo líquido por meio de filtros ópticos. Isto pode ser obtido pela técnica de Fluorescência Planar Induzida por Laser (*Planar Laser Induced Fluorescence - PLIF*) que será descrita brevemente a seguir.

Algumas substâncias apresentam a propriedade de fluorescência que consiste na emissão de luz em comprimento de onda diferente do comprimento de onda da luz incidente. O fenômeno de fluorescência pode ser considerado como instantâneo para as aplicações em escoamentos de fluidos, uma vez que o tempo decorrido entre a excitação e a emissão é da ordem de 10⁻¹⁵ segundos. A Figura 3.1 apresenta um espectro de absorção e emissão da susbtância Rodamina quando excitada por luz verde com comprimento de onda centrado em 542 nm. Na figura, a ordenada representa a intensidade da luz incidente ou emitida, enquanto a abscissa indica o comprimento de onda. Como pode ser observado, há um deslocamento do pico de emissão em relação ao de excitação, conhecido como deslocamento de Stokes. A utilização de um filtro óptico com comprimento de onda de corte de cerca de 550 nm seria capaz de separar a luz incidente da emitida.



Figura 3.1 - Espectro de absorção e fluorescência (Fonte: Thermo Scientific).

A fluorescência induzida por laser foi utilizada no presente trabalho para possibilitar a visualização da interface ar-água no escoamento anular. A Figura 3.2 auxilia na descrição da montagem experimental utilizada. Este arranjo foi adaptado do trabalho de Rodriguez & Shedd (2004).

Na figura, um feixe laser na forma de um plano de luz de pequena espessura incide através da parede transparente do tubo contendo o escoamento anular a ser visualizado. O escoamento é formado por ar e água contendo uma substância fluorescente, *Rodamina 610*, no nosso caso. A passagem do plano laser pelo líquido induz a fluorescência da Rodamina. Uma câmera digital posicionada ortogonalmente ao plano de luz captura a luz emitida pela fluorescência. Para que a câmera não receba também a luz muito mais intensa, proveniente da fonte de laser espalhada nas interfaces ar-água, um filtro óptico passa-alta com comprimento de onda de corte por volta de 550 nm é posicionado na frente da lente da câmera. Deste modo, somente a luz emitida pela fluorescência no líquido é capturada produzindo uma imagem de qualidade do filme de líquido.



Figura 3.2 - Vista esquemática da técnica de visualização baseada na Fluorescência Induzida por Plano de Laser – *PLIF* aplicada a escoamento bifásico anular horizontal.

A Figura 3.3 apresenta um diagrama que auxilia na compreensão da técnica de visualização empregada. O laser pulsado de Nd:YLF utilizado nos experimentos emite luz com comprimento de onda de 527 nm que incide na mistura água-rodamina e também nas interfaces ar-água. A luz proveniente da seção de testes possui comprimentos de onda de 527 nm (espalhamento das interfaces) e 610 nm (fluorescência do líquido). Após passar pelo filtro óptico, apenas o comprimento de onda de 610 nm sobrevive e alcança a câmera digital

registrando a imagem do filme de líquido. Detalhes dos equipamentos utilizados para aplicação desta técnica serão descritos no Capítulo 4.



Figura 3.3 - Diagrama do principio de funcionamento do sistema de visualização empregando a técnica *PLIF*.

3.2. Equalização do Índice de Refração

A utilização de técnicas ópticas de visualização qualitativa ou quantitativa de escoamentos confinados em dutos ou passagens delimitadas por paredes, enfrenta invariavelmente o problema de distorções ópticas. Estas distorções são introduzidas pela diferença de índices de refração entre o meio externo à seção de testes, o material da parede sólida e o fluido de trabalho no interior da seção de testes. Paredes com geometrias complexas, ou mesmo as simples paredes curvas de tubos, causam distorções que, muitas vezes, podem inviabilizar a interpretação dos resultados de um experimento de visualização, especialmente se este for destinado à obtenção de informações quantitativas do escoamento.

No caso particular do presente trabalho, o problema de distorções ópticas devido à variação de índices de refração torna-se relevante, pois o escoamento anular horizontal é caracterizado por espessuras de filme de líquido que variam de alguns poucos micrometros até alguns milímetros. Assim, a região de interesse para a medição do filme é exatamente a região muito próxima à parede do tubo onde as distorções ópticas devido à curvatura são mais relevantes.

O uso de materiais sólidos e fluidos com valores de índices de refração próximos é uma boa solução para possibilitar a visualização através de paredes curvas e superfícies livres. No entanto, encontrar um par de materiais adequados é uma tarefa difícil. Uma parte significativa de nosso esforço de pesquisa foi dedicada à busca de materiais sólidos e de fluidos de trabalho que minimizassem os efeitos de distorção e que fossem compatíveis com a técnica *PLIF* descrita anteriormente. Também, houve a preocupação de utilizar fluidos que não fossem tóxicos ou trouxessem outros perigos à saúde dos usuários do laboratório.

Dentre as várias possibilidades estudadas, duas alternativas foram selecionadas para resolver o problema decorrente da diferença de índices de refração entre o fluido de trabalho e o material da parede do tubo.

A primeira alternativa selecionada utilizou água como fluido de trabalho e tubo confeccionado com um material denominado *FEP*, *Fluorinated Ethylene Propylene*. Este material apresenta índice de refração muito próximo ao da água, tendo sido sua utilização primeiramente proposta para fins de visualização por Hewitt et al. (1990).

Na segunda alternativa considerada, utilizou-se tubo de acrílico e uma solução de água e iodeto de sódio que, em altas concentrações, apresenta índice de refração muito próximo ao do acrílico, como apresentado na Figura 3.4. Em ambas as soluções apresentadas, utilizou-se Rodamina 610 como a substância fluorescente misturada à água e a iluminação com um plano de luz laser verde, para permitir a visualização das interfaces líquido-gás através da técnica *PLIF*. A Figura 3.5 e a Figura 3.6 apresentam as imagens capturadas utilizando-se as duas configurações. Essas imagens foram comparadas para definir a opção em que se observa a melhor visualização da interface do filme base, característico do escoamento anular.



Figura 3.4 - Comparação entre o índice de refração do acrílico e da solução salina de iodeto de sódio.



Figura 3.5 - Imagens do escoamento do filme de líquido inferior em escoamento anular obtidas com água com Rodamina 610 escoando em tubulação fabricada em *FEP*.



Figura 3.6 - Imagens do escoamento do filme de líquido inferior em escoamento anular obtidas com solução salina de água e iodeto de sódio com Rodamina 610 escoando em tubulação fabricada em acrílico.

Analisando as figuras acima podemos observar que a utilização da opção com o tubo de *FEP* produziu imagens que apresentaram melhor contraste entre o líquido e o gás, melhor delineamento da interface e definição das bolhas e ondas. As imagens com a solução salina apresentaram um contraste inferior entre as fases. Além disto, a preparação da mistura é bastante trabalhosa, degrada quando exposta a luz ou oxigênio, e possui densidade muito elevada na concentração de 63% em massa de iodeto de sódio. Talvez esta solução seja interessante para seções de testes com geometrias complexas onde há maior facilidade na fabricação de peças em acrílico ou para visualização de escoamentos monofásicos.

Outro fator que dificulta a utilização da solução salina diz respeito à evaporação da água e conseqüente aumento da concentração de sal quando se utiliza um circuito de ar aberto para atmosfera. Neste arranjo, adotado em nossos experimentos, como será descrito no Capítulo 4, o ar proveniente do compressor, após circular pela seção de testes é direcionado para fora do

laboratório, enquanto a água é recirculada em um circuito fechado. A alternativa para este problema seria operar com o ar também em circuito fechado, o que obrigaria a instalação de trocadores de calor para manter a temperatura da solução estável.

Com o intuito de ilustrar o efeito obtido com o ajuste do índice de refração entre a parede do tubo e o fluido e trabalho, são apresentadas a seguir algumas figuras resultantes de testes realizados com tubos de vidro e de *FEP* imersos em água. Um papel milimetrado foi colocado como fundo nas imagens para permitir a avaliação das distorções ópticas. Na Figura 3.7(a), as imagens são de um trecho de tubo de *FEP* preenchido com água e colocado na posição vertical dentro da caixa de visualização cheia de água. Pode-se constatar na figura que não há distorções perceptíveis no papel milimetrado ao fundo. Note-se que mesmo nas regiões muito próximas à parede do tubo, onde há atenuação da luz, não há distorções. A Figura 3.7(b) mostra um tubo de vidro imerso em uma caixa, ambos preenchidos com água. Esta figura serve para ilustrar como distorções bastante significativas ocorrem quando o índice de refração do material não é próximo ao do fluido, como no caso do vidro em água.



Figura 3.7 - Teste de distorção de imagem utilizando (a) tubulação de *FEP* com água e (b) tubulação de vidro com água.

Diante das observações expostas, pode-se concluir que a alternativa utilizando a tubulação de *FEP* apresentou melhores resultados nos testes de definição de interface na imagem e de distorção. Portanto, esta foi a opção escolhida para contornar o problema de diferença de índice de refração na captura das imagens nos experimentos, eliminando os efeitos de curvatura, e obtendo imagens livres de distorção.

Para atingir o objetivo do presente estudo de investigar o escoamento anular horizontal e desenvolver técnicas de medição e visualização aplicadas a esta geometria de escoamento, projetaram-se duas seções de testes com tubos de *FEP*. A primeira foi montada com um tubo de 15,8 mm de diâmetro interno e espessura de parede de 0,8 mm, e a segunda, com tubos de 50,8 mm de diâmetro e espessura 1,6 mm. Para garantir a formação do escoamento anular foi utilizada uma seção de testes de 4,5 m de comprimento para a seção com menor diâmetro e de 11 m para a de maior diâmetro.

3.3. Montagem Óptica

Como já mencionado, o objetivo do presente trabalho é caracterizar o comportamento dinâmico do filme de líquido em escoamento anular horizontal através de medidas quantitativas, produzindo também visualizações do escoamento. Por se tratar de uma configuração com alto grau de complexidade, optou-se por testar as técnicas de medição e visualização em experimentos com escala reduzida, avaliando-se a viabilidade de sua utilização em escalas maiores. Também, devido à complexidade da configuração, os estudos foram iniciados com medições ópticas instantâneas do filme de líquido através de cortes longitudinais do filme na parte inferior do tubo. Em seguida, desenvolveuse uma técnica mais complexa que permitia a visualização e medição instantâneas da distribuição do filme ao redor da seção transversal do tubo.

Nas próximas seções será apresentada uma visão geral dos arranjos ópticos utilizados na implementação das duas técnicas de visualização desenvolvidas. Detalhes técnicos dos equipamentos utilizados serão apresentados no Capítulo 4, e o procedimento para a captura das imagens longitudinais e transversais serão relatados mais detalhadamente nos Capítulos 5 e 6, respectivamente.

3.3.1. Visualização Longitudinal Instantânea do Filme de Líquido

A Figura 3.8 auxilia na descrição dos ensaios realizados empregando visualizações longitudinais do filme de líquido. Nesta figura, o escoamento bifásico anular horizontal é representado esquematicamente. Pode-se observar o filme de líquido distribuído não uniformemente ao redor da parede do tubo devido ao efeito da gravidade e gotículas de líquido arrancadas pelo escoamento de gás.

Na figura é indicada a região de interesse, localizada no plano central do tubo, em sua geratriz inferior. Uma imagem real típica obtida utilizando-se a técnica de fluorescência, capturada durante os ensaios realizados, é apresentada na figura, onde pode-se ter uma melhor idéia da configuração instantânea do filme de líquido. As manchas brancas sobre o filme líquido, mas não conectadas a ele, são imagens de líquido fora do plano e não devem ser interpretadas como fazendo parte do filme de líquido inferior. Para referência, a espessura média do filme na imagem apresentada é de cerca de 0,6 mm.



Figura 3.8 - Imagem típica capturada pela técnica de visualização longitudinal implementada.

Para obtenção de imagens do filme de líquido como a apresentada na Figura 3.8, é necessária uma fonte de luz pulsada de alta energia e frequência de pulsos, sincronizada a uma câmera de alta frequência de captura de quadros. A alta energia é necessária, pois o sinal de fluorescência do líquido é de baixa intensidade. A combinação de alta frequência de pulsação e captura de imagens é necessária devido às frequências características da dinâmica do filme de líquido que se deseja capturar.

Para atender às exigências mencionadas no parágrafo anterior, foi utilizado um laser Nd-YLF de dupla cavidade. O feixe de laser de seção reta circular emitido pelo sistema era transformado em um plano de luz de pequena

espessura utilizando-se uma lente cilíndrica seguida de uma lente esférica. A lente cilíndrica transformava o feixe em um plano divergente, enquanto a lente esférica controlava a espessura do feixe.

A Figura 3.9 apresenta uma vista esquemática da montagem utilizada na visualização transversal do filme de líquido. O plano de luz proveniente do laser incidia sobre um espelho montado a 45°, penetrando na seção de testes de baixo para cima, como indicado. Um caixa de visualização de vidro preenchida com água foi montada ao redor do tubo de *FEP* por onde passava o escoamento anular a ser medido. Esta caixa de visualização de paredes planas ajudava a minimizar os efeitos de distorção óptica já comentados. A câmera digital foi montada em uma mesa de coordenada tri-axial fixada à uma bancada rígida, com o eixo de sua lente posicionado ortogonalmente ao plano de iluminação. O filtro óptico necessário para o funcionamento da técnica *PLIF* foi montado à frente da lente da câmera.

Durante os experimentos, sequências de milhares de imagens como aquela mostrada na Figura 3.8 eram adquiridas a taxas de amostragem que variavam de 250 a 3000 Hz, dependendo do tipo de medição que estivesse sendo realizada. Em seguida, as imagens armazenadas eram processadas por algoritmos especialmente desenvolvidos para extrair informações estatísticas sobre o comportamento dinâmico do filme de líquido. Estas informações incluíam a variação temporal da espessura do filme de líquido em uma dada posição no tubo, a espessura média e seu valor *RMS* (medida da intensidade das flutuaçãos da espessura de filme), o espectro de frequências e velocidade de propagação das ondas no filme. Além destas informações quantitativas, estavam disponíveis para análise as imagens que foram armazenadas e analisadas, o que auxilia na interpretação dos fenômenos físicos envolvidos no escoamento.



Figura 3.9 - Vista esquemática frontal da montagem óptica utilizada para a visualização e medição longitudinal do filme de líquido.

3.3.2. Visualização Transversal Instantânea do Filme de Líquido

Imagens instantâneas da seção tranversal do filme de líquido ao longo da parede interna do tubo foram obtidas com a montagem transversal estereoscópica implementada. Neste caso, o plano de luz foi girado de noventa graus iluminando uma seção transversal do escoamento. A Figura 3.10 apresenta uma imagem típica obtida em um dos ensaios conduzidos onde a distribuição não uniforme do filme ao longo do perímetro do tubo pode ser claramente identificada. Esta imagem é o resultado de um processo complexo de processamento de imagens obtidas por duas câmeras digitais posicionadas externamente ao tubo em uma montagem estereoscópica, formando um ângulo de aproximadamente 45° entre si.





Figura 3.10 - Imagem típica capturada pela técnica de visualização transversal implementada.

A montagem experimental desenvolvida para a obtenção destas imagens é apresentada de maneira esquemática em uma vista superior na Figura 3.11. O plano de luz laser produzido com o mesmo arranjo de lentes, já descrito anteriormente para a técnica de visualização longitudinal, era utilizado para iluminar uma seção transversal completa do tubo. O plano de luz atravessava a caixa de visualização preenchida com água que tinha duas de suas paredes montadas em ângulo. Ortogonalmente a cada uma destas paredes inclinadas era posicionada uma câmera digital de alta taxa de aquisição de imagens. Cada câmera observava em ângulo a seção reta do tubo iluminada pelo plano de luz laser. No entanto, com o escoamento em operação no regime anular, o filme de líquido em cada parede impede que uma dada câmera observe a parede oposta à sua posição. Desta forma, cada câmera limitou-se a capturar metade da seção reta do filme, ou seja, a câmera da direita observava a metade direita, enquanto a câmera esquerda, a metade esqueda. Estas imagens eram posteriormente juntadas por um processo automático de processamento de imagens produzindo a imagem instantânea da seção transversal do filme de líquido. Também nos experimentos de visualização transversal, foi utilizada a técnica *PLIF*, justificando a presença dos filtros ópticos representados na Figura 3.11.

A observação da seção reta do filme por câmeras montadas em ângulo produz imagens distorcidas que precisam ser corrigidas. Para isso foi desenvolvido um procedimento de calibração onde um alvo contendo uma matriz de pontos com espaçamento conhecido era introduzido no tubo. Imagens deste alvo eram obtidas pelas duas câmeras montadas em ângulo e alimentadas para um programa computacional desenvolvido. Este programa determinava dois polinômios interpoladores que, uma vez aplicados às imagens da esquerda e da direita, as distorciam recuperando sua forma original. Estes polinômios, obtidos na etapa de calibração, eram posteriormente aplicados em todas as imagens do escoamento, obtidas com as câmeras esquerda e direita. Estas imagens eram depois unidas reconstruindo a imagem da seção transversal do escoamento, como aquela apresentada na Figura 3.10. Os procedimentos de captura, calibração e processamento das imagens serão descritos de forma detalhada no Capítulo 6.

Assim como mencionado para o caso da visualização longitudinal, sequências de milhares destas imagens eram capturadas, armazenadas e analisadas produzindo as informações estatísticas sobre o comportamento dinâmico do filme. Nesta técnica, porém, de uma só vez, toda a distribuição circunferencial do filme está disponível para análise. Isto produz dados que, até o momento de preparação deste texto, ainda não haviam sido disponibilizados na literatura, o que confere um caráter de originalidade ao presente trabalho.



Figura 3.11 - Vista esquemática superior da montagem óptica estereoscópica utilizada para a visualização e medição da seção transversal do filme de líquido.

4 Montagem Experimental

Este capítulo dedica-se à apresentação dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento do trabalho experimental proposto. Primeiramente será apresentada uma visão geral e, em seguida, serão descritos os elementos constituintes do sistema e suas características de operação.

Como já foi mencionado anteriormente, projetou-se uma seção em escala reduzida com diâmetro interno de 15,8 mm, para avaliar as potencialidades da técnica óptica proposta. Depois de garantida a viabilidade da técnica, foi projetada e construída uma nova seção de testes com tubo de diâmetro interno de 50,8 mm, dimensão mais próxima daquelas encontradas em aplicações industriais.

A Figura 4.1 ilustra uma visão geral esquemática do funcionamento da seção de testes construída. O mesmo arranjo geral foi empregado nos ensaios com os dois diferentes diâmetros investigados.

Como indicado esquematicamente na Figura 4.1, a solução de água com rodamina armazenada no tanque de separação é bombeada para a seção de testes formada por um longo tubo de *FEP*. Ar do ambiente externo é bombeado para a seção de testes por meio de um compressor centrífugo. As correntes de ar e água passam por medidores de vazão encontrando-se em um misturador na forma de "T" onde o escoamento bifásico é formado. Após a passagem na tubulação de *FEP* da seção de testes o escoamento bifásico é conduzido ao separador de ar e líquido. O ar é conduzido para o exterior do laboratório enquanto a água é recirculada pela bomba. Ao final da seção de testes encontrase a caixa de visualização montada em torno do tubo de *FEP*. As medidas ópticas são realizadas na região do tubo envolvido pela caixa, onde incide o plano laser.



Figura 4.1 - Vista geral esquemática da seção de testes construída.

As subdivisões da seção de testes que merecem descrições exclusivas são a bancada experimental, a tubulação, o sistema de separação ar-água, a caixa de visualização e o sistema *PLIF*. A seguir serão apresentados os componentes que fizeram parte da montagem de cada uma das seções de testes projetadas.

4.1. Seção de Testes com Tubo de Diâmetro Interno de 15,8 mm

A Figura 4.2 e a Figura 4.3 apresentam uma visão geral desta seção de testes. As setas azuis e verdes indicam o sentido do escoamento de líquido e gás, respectivamente. Para apoiar toda a tubulação e fixar os equipamentos foi projetada uma estrutura construída com perfis de alumínio Bosch, o que garantiu uma montagem rígida, com possibilidade de controle fino de nível com todas as partes acopladas. Além disso, este tipo de montagem proporciona a liberdade de alterar a configuração facilmente em função de eventuais necessidades de posicionamento dos equipamentos e da seção de testes.



Figura 4.2 - Visão geral da seção de testes com diâmetro de 15,8 mm.



Figura 4.3 - Visão lateral da seção de testes com diâmetro de 15,8 mm.

O perfil de alumínio tinha o objetivo de apoiar o tubo de *FEP* ao longo de todo o seu comprimento. Uma mesa em perfil de alumínio foi montada ortogonalmente ao perfil longo para apoiar o laser, câmera, mesa de coordenadas e componentes ópticos. O comprimento total do tubo de *FEP* era de 4 m, ou 253 diâmetros. A caixa de visualização foi posicionada a 0,5 m da seção de saída do tubo, assim o escoamento dispunha de um comprimento de 222 diâmetros para desenvolver o padrão anular.

4.1.1. Sistema de Escoamento de Água

Foi utilizada uma bomba de cavidades progressivas fabricada pela Weatherford, modelo WHT 24/I, com motor de ½ CV de potência, que oferece uma pressão máxima de 6,0 Kgf/cm². A vazão máxima fornecida pela bomba é de 5,5 m³/h. A bomba era acionada por um inversor de freqüência da marca WEG.

Um sistema foi montado com o objetivo de reduzir oscilações geradas pela bomba para baixas rotações do rotor. Válvulas formando um *bypass* foram colocadas após a saída da bomba, oferecendo uma bifurcação para o escoamento. Deste modo, uma parte do escoamento era enviado para a seção de testes enquanto a outra era encaminhada para o reservatório. Com este sistema era possível utilizar rotações elevadas na bomba, garantindo um funcionamento contínuo do rotor e produzindo baixas vazões de líquido.

A vazão era medida por um rotâmetro da marca CONAUT modelo 440RN15 com escala de 0,21 a 2 l/min. A faixa de incerteza fornecida pelo fabricante é indicada na Tabela 4.1.

Q (I/min)	δQ/Q
0,2	0,25%
0,4	0,50%
0,8	0,17%
1,2	0,33%
1,6	0,42%
2.0	0,25%

Tabela 4.1 - Incerteza do rotâmetro de liquido da marca CONAUT modelo 440RN15 utilizado nos experimentos.

4.1.2. Sistema de Escoamento de Ar

O escoamento de ar na seção de testes foi produzido por um compressor centrífugo de duplo estágio da marca IBRAM, modelo CRB-14, também controlado por um inversor de freqüência da marca WEG. O motor de 23,2 CV fornece uma vazão máxima de 10 m³/min e uma pressão máxima de 4600 mm de coluna de água.

A vazão de ar foi medida com um rotâmetro OMEL, com fundo de escala 50 m³/h, calibrado contra uma placa de orifício construída de acordo com a

norma ASME (2004). O método adotado para a calibração do rotâmetro encontra-se no Apêndice A. Foram medidas pressão e temperatura do ar, para correção da vazão lida no rotâmetro, como será explicado a seguir.

4.1.3. Medição de Pressão e Temperatura

A pressão e a temperatura do ar foram medidas na entrada do rotâmetro, utilizando um manômetro de mercúrio e um termômetro digital, da marca Full Gauge e modelo TI-02, com resolução de 0,1°C. Essas medidas foram usadas para estimar a massa específica do ar nas condições de operação. A partir das condições de calibração do rotâmetro, realizada usando uma placa de orifício, e da massa específica do ar nas condições do experimento, era feita a leitura correta da vazão no rotâmetro conforme descrito no Apêndice A.

4.1.4. Tubulação da Seção de Testes

Distorções ópticas são minimizadas através da combinação entre o índice de refração da parede do tubo e da água, conforme já discutido no Capítulo 3. Por essa razão, a seção de testes projetada para o experimento empregou tubos fabricados de *FEP*, *Fluorinated Ethylene Propylene*, material que tem índice de refração próximo ao da água, o que permite a visualização do filme líquido nas regiões próximas à parede do tubo (Hewitt et al., 1990). O tubo utilizado na seção de testes possuia diâmetro interno de 15,8 mm e comprimento total de 255 diâmetros.

Os tubos de 15,8 mm de diâmetro fabricados em *FEP* não possuem boa rigidez estrutural, sendo muito maleáveis e podendo ser facilmente avariados ou amassados, impossibilitando a realização do alinhamento dos mesmos, quando fixados a bancada experimental. Com objetivo de melhorar a resistência mecânica do tubo de *FEP* e de viabilizar a centralização, fixação e o alinhamento da seção de testes na bancada experimental, este foi inserido em um tubo de PVC transparente com diâmetro interno de 18 mm. Este revestimento foi utilizado em toda a extensão da seção com exceção da região de visualização.

Água e ar entram na tubulação por um misturador de PVC na forma de "T" com diâmetro de ¾", conectado no tubo de *FEP*, como pode ser visto na Figura 4.4.



Figura 4.4 - Misturador ar-água

A tubulação foi apoiada em perfis Bosch com dimensões de 45x45 mm. Estes perfis, selecionados devido à sua excelente linearidade e facilidade de montagem, foram conectados a outros perfis iguais através de cantoneiras.

4.1.5. Tanque de Separação

A separação entre ar e água após a passagem na seção de testes foi realizada utilizando-se um tanque separador de aço inox com capacidade para 50 litros, que possuía uma entrada e duas saídas, conectado no final da seção de testes por uma mangueira.

A mistura de ar e água entrava pela parte superior do tanque e era conduzida para o fundo deste por um tubo em forma de "L". Como pode ser visto na Figura 4.5, este tanque possui uma placa separadora no seu interior que impedia que a água saísse pela abertura de ar superior na forma de gotículas. A água depositava-se então no fundo do tanque, e depois era conduzida para a bomba por uma mangueira localizada na parte inferior. O ar era eliminado para fora do laboratório por uma mangueira conectada na abertura da parte superior do tanque.



Figura 4.5 - Vista do tanque com destaque para a placa separadora em seu interior.

4.1.6. Sistema de Medição por Fluorescência Induzida por Laser – PLIF

Os equipamentos utilizados para a medição pela técnica de fluorescência induzida por laser – *PLIF* – estão ilustrados na Figura 4.6 abaixo. A seguir será feita uma descrição dos elementos constituintes para aplicação desta técnica: laser, corante fluorescente, caixa de visualização, sincronizador, câmera digital, lentes, filtros ópticos e espelho.



Figura 4.6 - Esquema da montagem óptica para aplicação da técnica PLIF.

4.1.6.1. Laser

Foi utilizado um laser pulsado de dupla cavidade e alta taxa de repetição do tipo Nd:YLF, da marca New Wave[®]. O laser emite em comprimento de onda igual a 527 nm com pulsos de 5 ns de duração, e sua energia varia com a taxa de repetição, de acordo com o gráfico da Figura 4.7.



Figura 4.7 - Energia emitida por cada pulso do laser em função da taxa de repetição. (Fonte: www.new-wave.com).

4.1.6.2. Corante Fluorescente

O fluido utilizado foi uma mistura de água com o corante *Rhodamine 610 Chloride*, produzido por Exciton a uma concentração de 500 µg/l. A escolha da concentração da mistura foi realizada a partir de testes preliminares. Ao ser iluminada com o laser, a rodamina fluoresce, emitindo luz a um comprimento de 610 mm. Testes realizados indicaram que a massa específica e viscosidade da água não foram alteradas com a adição do corante.

4.1.6.3. Caixa de Visualização

Um dos grandes desafios impostos às técnicas utilizadas neste estudo são as distorções ópticas que ocorrem devido aos diferentes índices de refração dos meios em questão. Além da utilização de material do tubo com índice de refração próximo ao da água, foi também adotada uma a solução baseada no uso de uma caixa de visualização ao redor do tubo de *FEP*. Esta foi preenchida com água para minimizar as distorções ópticas da curvatura do tubo.

A Figura 4.8 apresenta o desenho da caixa de visualização montada em acrílico, com exceção das partes inferior e superior que possuíam janelas de vidro. O vidro foi utilizado para resistir à potência do feixe de laser incidente evitando assim a queima das faces de acrílico da caixa. As vedações com o tubo de PVC que atravessava a caixa foram feitas utilizando flanges aparafusados com O-rings. A caixa de visualização foi instalada a uma distância de 222 diâmetros da entrada da tubulação.

O formato da caixa foi projetado de forma a possibilitar a visualização longitudinal e transversal do escoamento. Para reduzir distorções ópticas suas faces foram dispostas de modo que a câmera estivesse sempre montada ortogonalmente à parede de vidro para ambas as configurações de medição (longitudinal e transversal). Para a medição estereoscópica, as câmeras eram dispostas com um ângulo de 45° em relação ao eixo d o tubo.



Figura 4.8 - Vista superior da caixa de visualização da seção com tubo de 15,8 mm de diâmetro.

4.1.6.4. Sincronizador de Sinais

Um sincronizador de sinais foi utilizado para realizar a tarefa de controle e ativação dos sinais, garantindo a precisa sincronização do disparo do laser e a captura das imagens pela câmera digital. Para isso, foi utilizado o sincronizador da TSI modelo 610035 programado pelo *software* Insight 3G[®] versão 9.0.5.1.

4.1.6.5. Câmera Digital e Lentes Objetivas

Para a realização das medidas do comportamento dinâmico da altura do filme de líquido no escoamento anular pelo método óptico proposto, é necessário utilizar uma câmera digital que seja capaz de registrar imagens com boa resolução espacial a elevadas taxas de aquisição. A câmera digital utilizada encontrava-se disponível no laboratório fazendo parte de um sistema *PIV* de alta frequência de aquisição de imagens. Este sistema também utiliza câmeras de alta frequência, boa resolução espacial, sincronizadas a lasers pulsados de alta taxa de repetição. Assim, a câmera disponível era perfeitamente adequada para os propósitos do presente trabalho.

A câmera empregada, modelo *Motion Pro X3* fabricada pela *IDT*, utiliza tecnologia de sensores de imagem CMOS, oferecendo resolução espacial máxima de 1280x1024 *pixels*. A câmera era controlada pelo programa *IDT Motion Studio*[®]. As imagens capturadas eram armazenadas na memória da câmera e depois transferidas para o computador. A memória máxima disponível era de 8 Gb, o que limitava o número máximo de imagens que podiam ser capturadas.

As imagens longitudinais do filme de líquido inferior foram obtidas com uma resolução espacial de 512x512 *pixels*. Nesta configuração a câmera era montada em uma mesa de coordenadas tri-axial fixada na bancada do lado oposto ao laser.

Para o caso da visualização estereoscópica, foram usadas duas câmeras *IDT Motion Pro X3*, posicionadas a 45° em relação ao tubo, como já foi mencionado no Capítulo 3. As câmeras foram montadas em dois suportes giratórios, que permitiram o ajuste dos ângulos de observação, que foram fixados em uma mesa posicionada ortogonalmente a seção de testes. As imagens transversais do escoamento foram capturadas com uma resolução de 1280x1024 *pixels* para que toda a seção reta do tubo fosse registrada.

Lentes com diferentes distâncias focais e ampliações foram utilizadas nas medições de espessura de filme e velocidade de propagação das ondas, sendo os resultados obtidos comparados. Um procedimento de calibração realizado para cada lente e ampliação utilizados, fornecia a relação entre a medida em milímetros no domínio do escoamento com o número de *pixels* no sensor da câmera. Os procedimentos de calibração das imagens longitudinais e transversais serão descritos nos Capítulos 5 e 6, respectivamente. Para cada aplicação específica – medida de altura de filme, frequência de ondas ou velocidade de ondas – era escolhida a resolução espacial mais adequada. A definição da resolução espacial adequada para cada aplicação era guiada pelo procedimento de análise de incertezas experimentais descrito no Apêndice B.

Nos estudos realizados foram utilizadas nas câmeras, lentes objetivas Nikon/Nikkor com distâncias focais de 105 mm e 60 mm, gerando diferentes resoluções espaciais. Quando não era possível ter acesso óptico à seção de testes com a câmera e conciliar a distância focal da lente com a resolução espacial ideal, anéis de extensão eram adaptados às lentes para ampliar a imagem. Obviamente, cada conjunto de lente e aneis de extensão era calibrado para determinar a resolução espacial produzida pelo conjunto.

4.1.6.6. Filtros Ópticos

A luz do feixe laser refletida na interface ar-água e nas paredes do tubo é muito mais intensa que a luz emitida pelo efeito de fluorescência da rodamina, misturada no líquido. Para evitar que a luz verde refletida atinja a câmera saturando o sensor e impedindo o registro do sinal de fluorescência, um filtro óptico passa-alta foi fixado na caixa de visualização, na frente da lente objetiva da câmera.

O filtro selecionado foi o modelo FSQ-OG550 fabricado pela Melles Griot e apresenta as características indicadas na Figura 4.9. Nota-se na figura que o comprimento de onda de corte do filtro é da ordem de 550 nm adequado para bloquear a luz verde do laser com comprimento de onda da ordem de 527 nm, deixando passar a luz da fluorescência com comprimento de 610 nm. A Figura 4.10 foi preparada para ilustrar o efeito da utilização do filtro óptico passa-alta na imagem capturada.



Figura 4.9 - Curva de transmissividade do filtro óptico utilizado (Fonte: www.mellesgriot.com).

A figura apresenta as imagens de um alvo de calibração metálico introduzido dentro da tubulação preenchida com a mistura de água e rodamina e iluminada por um feixe cilídrico de luz laser verde. A Figura 4.10(a) foi capturada com a utilização do filtro passa-alta posicionado na frente da câmera, enquanto a imagem da Figura 4.10(b) foi obtida sem a utilização do filtro. A eliminação das reflexões fica evidente na comparação entre as duas imagens.



Figura 4.10 - Imagens do alvo de calibração posicionado dentro do tubo preenchido com solução de água e rodamina e iluminado com um feixe cilíndrico de luz verde proveniente do laser.(a) com filtro óptico passa-alta e (b) sem filtro óptico.

4.1.6.7. Conjunto de Lentes Formadoras do Plano de Luz e Espelho

Como já foi dito anteriormente, o laser emitido pelo sistema de iluminação apresenta uma seção reta aproximadamente cilíndrica. Para obter um plano de luz de pequena espessura, indispensável para a aplicação da técnica *PLIF*, o feixe de luz laser passa por um jogo de lentes esférica e cilíndrica que controlam as dimensões da área iluminada, como ilustrado na Figura 4.11.

A lente cilíndrica controla a divergência do plano de luz e não tem efeito sobre sua espessura. O laser diverge em apenas uma direção quando atravessa uma lente cilíndrica de distância focal negativa. A escolha desta lente depende da dimensão do plano a ser iluminado. A lente esférica de distância focal positiva reduz minimamente esta divergência no plano. Tipicamente, o comprimento focal da lente esférica é muito maior que o da lente cilíndrica, fazendo com que a seleção das lentes seja independente uma da outra. As lentes esféricas são empregadas para controlar a espessura do plano de luz, convergente apenas até o comprimento focal da lente.

A imagem é capturada na zona do ponto focal mencionada onde a espessura do plano de luz é mínima, região onde a intensidade da luz é maior.



Figura 4.11 - Diagrama de lentes para formação do plano de luz com um laser (Aniceto P. H. S., 2007).

No caso das medições longitudinais do filme de líquido, foi usada uma lente cilíndrica, de -50 mm, e uma esférica, com distância focal de 1000 mm. Na visualização transversal do escoamento, as distâncias focais das lentes cilíndrica

e esférica foram, respectivamente, -25 mm e 500 mm. Essa opção entre as lentes a serem utilizadas era determinada de acordo com a dimensão da região de interesse e a distância do caminho óptico entre a objetiva da câmera e a seção de testes. Esses conjuntos permitem gerar um plano de espessura de aproximadamente 0,5 mm.

No caso da montagem longitudinal, foi utilizado um espelho fixado em um suporte com ângulo de 45°, abaixo da seção, para que o feixe de laser fosse direcionado à seção de testes, iluminando-a de baixo para cima. Para esta tarefa foi selecionado um espelho de reflexão na primeira superfície modelo 10Q20HE.2 da Newport com capacidade de suportar o nível de energia produzido pelo laser utilizado.

Na montagem estereoscópica, diferentes configurações de iluminação foram testadas. O arranjo que forneceu melhor visualização do escoamento foi a iluminação incidente pela parte superior da caixa de visualização, na qual a maior intensidade do laser incidia primeiramente no filme líquido de menor espessura. Isto foi essencial uma vez que a fluorescência é proporcional à quantidade de líquido na região excitada. Nesta configuração o laser iluminava o filme líquido ao longo de toda a circunferencia do tubo. A comparação entre as imagens iluminadas com as diferentes configurações de iluminação é apresentada na Seção 6.3.

4.2. Seção de Testes com Tubo de Diâmetro Interno de 50,8 mm

A seção de testes com diâmetro de 50,8 mm tem um funcionamento semelhante ao da seção com tubo de 15,8 mm, descrita acima. A seguir serão apresentados os equipamentos que fizeram parte da montagem desta bancada de testes. A Figura 4.12 apresenta uma visão geral desta seção.



Figura 4.12 - Visão geral da seção de testes com tubo de diâmetro de 50.8 mm.

4.2.1. Sistema de Escoamento da Água

A bomba utilizada para circular a água foi uma bomba de cavidades progressivas Weatherford, modelo WHT 32/I, com motor de 1 CV de potência, que fornece uma pressão máxima de 6,0 Kgf/cm² e uma vazão máxima de 12 m³/h.

A rotação da bomba era controlada por um inversor de frequência da marca WEG. A vazão foi medida por um medidor de turbina da marca Contech, com faixa de operação de 0,67 à 6,8 m³/h cuja incerteza na medição é de 1%.

4.2.2. Sistema de Escoamento de Ar

Para o escoamento do ar foi utilizado o mesmo compressor centrífugo utilizado na seção de 15,8 mm. A tubulação de saída do compressor era compatível com as entradas de ar das duas seções, que era conectada no início da realização dos testes.

A vazão de ar foi medida com um medidor de turbina da marca Contech, com faixa de operação de 85 à 850 m³/h, cuja incerteza na medição é de 0,6 %.

4.2.3. Medição de Pressão e Temperatura

A pressão e a temperatura do ar foram medidas em duas posições – na entrada do medidor de vazão de ar, logo após o misturador, e no final da seção – utilizando um manômetro de mercúrio e termômetros digitais da marca Full Gauge e modelo TI-02, com resolução de 0,1°C. Essas medidas foram utilizadas para corrigir a massa específica do ar com as condições de operação e verificar possíveis variações de temperatura entre o início e o fim do escoamento.

4.2.4. Tubulação da Seção de Testes

A seção de testes de maior diâmetro projetada também empregou tubo fabricado de *FEP*. Um tubo de diâmetro interno de 50,8 mm, espessura de 1,6 mm e comprimento total de 217 diâmetros foi utilizado. Esse diâmetro se aproxima das dimensões encontradas nas aplicações industriais. Por ter o dobro da espessura da tubulação da seção descrita anteriormente, o tubo de *FEP*

apresentava rigidez estrutural satisfatória e não foi necessário revestí-lo com o tubo de PVC.

Os tubos de *FEP* estão disponíveis comercialmente em trechos com comprimentos de 7 m. Para emendar os trechos sem produzir desníveis internos, utilizou-se um sistema de luvas usinadas em polipropileno que se adaptavam ao diâmetro externo dos tubos de *FEP* permitindo o encaixe de topo entre os tubos. A vedação da junção era promovida por o-rings montados na face interna da luva.

A água e o ar entravam na tubulação por um misturador de PVC na forma de "T" com diâmetro de 2", conectado no tubo de *FEP* por uma conexão em polipropileno. No início da seção de testes, antes do misturador, uma válvula anti-retorno foi colocada na tubulação de ar para impedir o retorno da água. Essa válvula foi essencial, pois em testes anteriores com escoamento monofásico de água, havia a possibilidade de retorno da água para a linha de ar.

A tubulação de *FEP* foi apoiada em perfis Bosch com dimensões de 45x60 mm montados na mesma estrutura da base da seção de 15,8 mm. Este arranjo paralelo foi uma forma de melhor otimizar o espaço disponível no laboratório aproveitando parte da montagem óptica preparada para a seção de 15,8 mm. A Figura 4.13 ilustra as duas seções de testes acopladas montadas em paralelo sobre as bases.



Figura 4.13 - Acoplamento entre a base das duas seções de testes.

4.2.5. Sistema de Separação

Foram utilizados dois tanques para realizar o processo de separação do ar e da água provenientes da mistura bifásica. O primeiro tanque, com capacidade para 100 litros, foi conectado na saída da tubulação através de uma mangueira. Este tanque tinha a função de receber o escoamento bifásico, pressurizado e com vazões de ar e água elevadas. Através de uma saída superior, a pressão interna do tanque era aliviada e o ar ainda com gotículas era conduzido para um segundo tanque. Pela abertura inferior do tanque, a mistura de água e rodamina era bombeada também para o segundo tanque, com capacidade para 150 litros. Essa mistura ainda apresentava ar na solução e inviabilizava a conexão direta com a bomba de cavidades progressivas, como foi feito na seção com menor diâmetro. Uma bomba centrífuga intermediária de ¾ cv era responsável por bombear a mistura de um tanque para o outro.

O segundo reservatório recebia a mistura ar-água e o ar ainda presente na solução era eliminado por uma saída superior. A bomba de cavidades progressivas era então alimentada por uma mangueira conectada na parte inferior do segundo tanque. Nesse estágio, apenas a água era depositada no tanque, o que eliminava a entrada de ar na sucção da bomba. A Figura 4.14 ilustra o sistema de separação ar-água em dois estágios.



Figura 4.14 - Sistema de separação ar-água em dois estágios.

4.2.6. Sistema de Medição por Fluorescência Induzida por Laser – PLIF

O laser, a câmera, o corante fluorescente, o sincronizador de sinais e o filtro óptico empregados nos ensaios com a seção de 50,8 mm foram os mesmos utilizados na seção de menor diâmetro. Alterações que merecem destaque estão na caixa de visualização e lentes utilizadas e serão descritas a seguir.

4.2.6.1. Caixa de Visualização Octogonal

Devido à necessidade de projetar uma nova caixa de visualização que se adaptasse à seção de maior diâmetro, uma nova configuração foi concebida com o objetivo de facilitar e melhorar a visualização do escoamento no interior do tubo. Uma caixa octogonal em acrílico foi projetada e construída para permitir a visualização longitudinal e futuramente, uma configuração estereoscópica com diferentes campos de visualização. Assim como a caixa anteriormente descrita, houve a preocupação em se colocar janelas de vidro na parte inferior e superior para evitar que a alta potência do laser queimasse as paredes de acrílico da caixa.

Esta concepção da caixa de visualização permitiu que as lentes das câmeras fossem montadas ortogonalmente às paredes da caixa, o que diminui as distorções nas imagens. A Figura 4.15 apresenta o desenho da caixa de visualização construída.



Figura 4.15 - Vista superior da caixa de visualização construída para a seção de 50,8 mm. Setas indicam as faces da caixa para realizar a visualização longitudinal e transversal.
4.2.6.2. Lentes Objetivas

Optou-se por utilizar a lente objetiva Nikon/Nikkor de distância focal de 60 mm para todas as medições. Esta lente foi utilizada em todos os testes, pois garantia uma ampliação menor que a lente de 105 mm, e toda a seção transversal do tubo pôde ser capturada pelas câmeras.

5 Experimentos para Medição Longitudinal do Filme de Líquido

Os experimentos realizados no presente estudo tiveram como enfoque principal o desenvolvimento e validação de técnicas ópticas de medição do comportamento dinâmico do filme de líquido presente no escoamento anular bifásico horizontal. Dois modos de visualização foram testados, produzindo diferentes visões do filme de líquido e produzindo informações quantitativas sobre o comportamento dinâmico do mesmo. Os dois modos de visualização implementados – longitudinal e transversal – já foram apresentados de maneira breve no Capítulo 3.

Em ambos os casos, a técnica de Fluorescência Planar Induzida por Laser – *PLIF* – foi empregada para permitir a separação óptica da luz emitida pelo filme daquela espalhada na interface ar-água. Um tubo fabricado de *FEP* foi utilizado para resolver o problema do ajuste do índice de refração, permitindo uma boa visualização do filme perto da parede da tubulação.

A partir das imagens capturadas, procedimentos de processamento digital de imagens foram utilizados para quantificar a região do filme de líquido em cada imagem, produzindo as informações quantitativas desejadas.

Neste capítulo serão descritos os procedimentos utilizados para a condução dos experimentos baseados na técnica de visualização longitudinal e o processamento digital de imagens elaborado para a extração quantitativa do comportamento temporal do filme líquido. Os procedimentos adotados para a captura e processamento de imagens transversais serão descritos no Capítulo 6.

5.1. Aquisição das Imagens Longitudinais

Essa seção dedica-se à apresentação dos procedimentos utilizados para a realização da visualização longitudinal do escoamento. Aspectos relacionados ao alinhamento óptico, acionamento dos equipamentos, calibração e resolução das imagens e realização do experimento serão apresentados.

5.1.1. Preparação da Seção de Testes e Acionamento dos Equipamentos

Antes da instalação dos equipamentos de visualização e iluminação, a seção de testes formada pelo tubo de *FEP* era alinhada e nivelada, para garantir um escoamento horizontal. Em seguida, os componentes ópticos eram montados e alinhados. A Figura 5.1 apresenta uma vista da montagem dos componentes ópticos preparados para a visualização longitudinal do filme de líquido inferior no interior do tubo. O feixe plano de laser pode ser visto incidindo na caixa de visualização por baixo, após ser desviado pelo espelho posicionado à 45°, cruzando o tubo de *FEP* em um plano meridional e saindo pela parte superior da caixa de visualização. A câmera montada ortogonalmente ao plano de luz está focalizada no plano de iluminação.

Os alinhamentos da câmera, laser, lentes e principalmente do espelho óptico eram verificados antes de cada série de medições. As lentes cilíndricas e esféricas para cada configuração óptica foram escolhidas após diferentes testes. A configuração considerada ideal fornecia um plano de laser com espessura de aproximadamente 0,5 mm no filme de líquido, iluminando toda a região de interesse.

A câmera era então acionada juntamente com seu programa de controle *IDT Motion Pro X3*[®]. O banho de refrigeração do laser era então ligado e aguardava-se até que a temperatura recomendada de operação de 27°C fosse atingida. Em seguida, o sincronizador de sinais e o laser eram acionados pelo programa Insight 3G[®]. Este programa era responsável também pelas configurações da frequência de pulsos do laser, da frequência de captura das imagens e do ajuste do tempo de exposição do sensor da câmera.

Nos experimentos foi utilizado um laser pulsado de dupla cavidade. Para aumentar a intensidade da luz em cada quadro da imagem, optou-se por disparar as duas cavidades do laser simultaneamente.



Figura 5.1 - Configuração utilizada para a captura de imagens longitudinais do filme de líquido na parte inferior do tubo.

5.1.2. Calibração das Imagens

Para a determinação da espessura do filme de líquido a partir das imagens capturadas é necessário realizar um procedimento de calibração que determina a correspondência entre as dimensões reais no plano do escoamento e as dimensões em *pixels* na imagem. Este procedimento de calibração foi realizado utilizando um alvo inserido dentro do tubo de testes, pela saída da seção, após a remoção da mangueira de retorno.

Para a seção de menor diâmetro, o alvo foi montado a partir de um cilindro de latão com 1 m de comprimento. Na extremidade do cilindro, foi usinada uma meia-cana com 50 mm de comprimento, formando uma seção plana, que era montada de modo a ficar alinhada com o plano vertical de iluminação do laser e, consequentemente, ortogonal à câmera. Nesta seção plana foi usinada uma malha padrão constituída de linhas verticais e horizontais espaçadas regularmente de 1 milímetro. A outra extremidade do alvo possuía um sistema de encaixe com O-rings que selava a água dentro do tubo de *FEP*. Esta conexão foi usinada em polipropileno e possuía um respiro que permitia que o ar existente na tubulação fosse eliminado, deixando o tubo completamente

cheio da solução de água e rodamina envolvendo o alvo de calibração. A Figura 5.2 ilustra as partes do alvo de calibração introduzido na seção de testes.



Figura 5.2 - Alvo de calibração introduzido na seção de testes.

Para a seção de maior diâmetro, um sistema de calibração foi projetado com concepção igual ao da seção de menor diâmetro. O alvo foi montado a partir de um cilindro de 2 m de comprimento, permitindo a colocação da malha de calibração na região de visualização. Analogamente ao alvo descrito anteriormente, este possuía em sua extremidade uma grade padrão usinada com o mesmo espaçamento, porém com o dobro do comprimento.

Após o posicionamento do alvo, a seção de teste era preenchida com a solução de água e rodamina usadas nos experimentos e o ar removido pelo respiro disponível na conexão posicionada na extremidade do calibrador. O laser era acionado em baixa intensidade e o plano do alvo do calibrador era alinhado de modo que o plano do laser apenas tocasse a face do alvo de calibração. Nesta posição garantia-se que o plano de luz estava penetrando no tubo através de um plano diametral vertical. A Figura 5.3 ilustra o alvo de calibração introduzido na seção de testes alinhado com o plano de laser.



Figura 5.3 - Detalhe do alvo de calibração posicionado dentro na seção de testes e alinhado com o plano de laser.

Uma vez alinhado o alvo com o plano do laser, o laser era desligado e um foco de luz branca externa era ligado para iluminar o alvo de calibração. A câmera era então focalizada no alvo de calibração. O ajuste do foco era realizado diretamente no anel de focalização da lente ou movimentando-se a mesa de coordenadas que sustentava a câmera, alterando a distância entre a câmera e o alvo. A imagem focada era antão capturada. A Figura 5.4 apresenta uma imagem típica do alvo capturada no procedimento de calibração.



Figura 5.4 - Imagem do alvo de calibração posicionado dentro da seção de testes capturado pela câmera.

A calibração pixel/mm era determinada com o auxílio de um programa de ImageJ[®]. A imagem do alvo de calibração era edição de imagens, o apresentada pelo programa e uma função de medição de distâncias era utilizada para determinar a distância, em pixels, entre dois pontos de interseção de linhas da malha de calibração. A razão entre a medida em pixels e a distância conhecida do alvo fornecia a calibração desejada. Neste procedimento, o fator de calibração era, na verdade, obtido pela média de diversas operações de calibrações realizadas consecutivamente. Além disto, para minimizar a incerteza da calibração, eram escolhidas distâncias entre os pontos de no mínimo 7 mm para a medição em pixels. Deve-se mencionar que as medições realizadas nas regiões da imagem perto das paredes e no centro, tanto no sentido vertical quanto horizontal, apresentaram a mesma calibração, indicando que não havia distorções ópticas significativas. Depois de terminado o procedimento de calibração, o alvo era retirado e nenhuma alteração no sistema óptico era realizada. Os experimentos de medição eram conduzidos sob as mesmas

condições de calibração, ou seja, mesma distância da lente ao plano iluminado e mesmo ajuste de foco.

De posse do fator de calibração da imagem para a lente utilizada e para uma determinada distância entre a lente e o plano iluminado escolhida, era realizada uma estimativa das incertezas nas medições quantitativas a serem realizadas, como espessura de filme e velocidade de onda. A incerteza nestas grandezas é diretamente influenciada pela resolução espacial da imagem. Caso a calibração não produzisse um valor de incerteza aceitável, a ampliação da imagem era alterada, modificando a lente objetiva, aproximando ou afastando a câmera, ou inserindo anéis de extensão. Em seguida, um novo procedimento de calibração era realizado. O Apêndice B descreve detalhadamente o procedimento adotado para a estimativa dos níveis de incertezas experimentais associadas ao processo de calibração espacial utilizado.

5.1.3. Captura das Imagens

O experimento propriamente dito era iniciado pelo ajuste das vazões de ar e água da configuração a ser ensaiada. O ajuste da vazão era realizado controlando-se os inversores de frequência da bomba e do compressor até que o par de vazões indicadas pelos medidores de vazão atingissem os valores desejados. Através da leitura do termômetro e manômetro localizados na entrada do rotâmetro de ar, a correção da vazão com a densidade nas condições de operação era feita conforme descrito no Apêndice A.

Com os parâmetros de vazão de água e ar ajustados conforme desejados, as imagens da parte inferior do filme líquido eram capturadas em tempo real pela câmera posicionada ortogonalmente ao plano de luz.

Uma série de experimentos foi realizada para validar a técnica desenvolvida. As vazões foram escolhidas de modo a que todos os casos testados estivessem dentro do regime anular de escoamento. A matriz de testes investigada é apresentada no Capítulo 8, onde os resultados obtidos são analisados.

A câmera, controlada pelo *software IDT Motion Pro X3*[®], gravava as imagens longitudinais do escoamento. Todas as imagens eram armazenadas na memória interna câmera, limitada em 8 Giga *bytes*, e descarregadas para o computador no fim de cada experimento. Devido a esta limitação, a escolha da frequência de aquisição e tamanho das imagens era muito importante,

interferindo na resolução dos dados medidos. No caso da medição da espessura média do filme de líquido, valor *RMS* da espessura de filme ou determinação do espectro de frequência das ondas, é importante, para se obter um nível de incerteza satisfatório, que um longo registro temporal da espessura de filme esteja disponível. Quanto mais longo for o registro, menor a incerteza nessas grandezas. Assim, para estes ensaios, optou-se por operar a câmera e o laser sincronizados em uma frequência de 250 Hz. A resolução espacial considerada adequada para caracterizar a espessura do filme de líquido foi de 512x512 *pixels*. Esta combinação de valores de frequência de aquisição de imagens e resolução espacial permitia a gravação de cerca de 52 segundos de escoamento o que produziu níveis de incertezas experimentais considerados satisfatórios.

Para a medida da velocidade de propagação das ondas, foi utilizado o método de correlação cruzada dos sinais de variação temporal da espessura do filme de líquido medidos em duas posições axiais próximas no tubo, que será descrito em detalhes no Capítulo 7. Neste caso, a utilização de baixas frequências de aquisição de imagens impede a captura dos padrões de onda dentro do campo de visão da câmera. Assim, torna-se necessária a utilização de altas taxas de aquisição de imagens, o que limita o tempo máximo de captura. Na medição da velocidade de propagação de ondas foi utilizada uma frequência de aquisição de 3000 Hz e uma resolução espacial de 512x512 *pixels*, para a seção de menor diâmetro, e 512x1280 *pixels*, para a outra. Esta configuração resultou em apenas 4,5 segundos de tempo de gravação do escoamento.

5.1.4. Resolução Espacial das Imagens

Neste estudo foram utilizadas diferentes configurações de ampliação da imagem, uma estratégia de fundamental importância para garantir níveis de incerteza na medição dentro de limites aceitáveis. O cálculo das incertezas embutidas nas grandezas medidas para cada resolução será explicado detalhadamente no Apêndice B.

Para os experimentos de medida de espessura de filme na seção de 15,8 mm de diâmetro, a montagem óptica utilizou uma melhor resolução espacial, ou seja, uma maior ampliação, resultando em um número maior de *pixels* por milímetro na calibração. A resolução espacial gerada por essa configuração foi de 50,2 *pixel/*mm. A metodologia de cálculo da espessura do filme será descrita na Seção 5.2.4.

A calibração com uma menor ampliação foi utilizada para o cálculo da velocidade através do sinal de espessura de filme. Esta ampliação permitia que em vários quadros seguidos, a mesma onda ainda estivesse percorrendo o campo de visão da câmera. A resolução espacial utilizada para esta configuração foi de 18,2 *pixel*/mm. A metodologia de cálculo da velocidade de propagação das ondas do filme de líquido será descrito no Capítulo 7.

A Figura 5.5 ilustra um esquema da seção de testes de 15,8 mm de diâmetro para a melhor compreensão da região visualizada pela câmera, configurações ópticas e resoluções espaciais resultantes em cada caso estudado para obtenção das imagens longitudinais. Na figura, a menor janela corresponde à maior resolução obtida e utilizada na determinação dos valores médio e *RMS* da espessura do filme de líquido, assim como na determinação de espectro de frequências do sinal de espessura de filme. A maior janela de observação foi utilizada na medição da velocidade de propagação das ondas do filme de líquido.



Figura 5.5 - Esquema das configurações ópticas aplicadas nos testes longitudinais para a seção de 15,8 mm de diâmetro.

Sempre houve preocupação de que pelo menos metade do tubo fosse capturado pela câmera para evitar que alguma grande onda não fosse registrada. A resolução máxima da câmera é 1280x1024 *pixels*, entretanto a resolução utilizada para todos os casos conduzidos na seção de 15,8 mm foi de 512x512 *pixels*. Devido a uma limitação de memória da câmera, a resolução da imagem foi diminuída para aumentar o número de imagens armazenadas, melhorando a resolução temporal e, consequentemente, a incerteza no cálculo das grandezas estatística relevantes para o fenômeno.

Para a seção de testes com tubo de 50,8 mm de diâmetro, a sua maior dimensão tornou necessária a utilização de lente que gerasse uma menor ampliação da imagem, acarretando em uma resolução espacial de 21,7 *pixel*/mm. Nesta configuração, a incerteza na medição de espessura instantânea de filme é maior.

Uma alternativa para melhorar a resolução espacial seria aumentar o tamanho da imagem de 512x512 para 1280x1024 *pixels*, aumentando a ampliação, sem comprometer o campo de visão de pelo menos metade do tubo. Essa alternativa foi descartada, pois limitaria o tempo de amostragem à metade, devido ao tamanho fixo da memória da câmera, o que afetaria a resolução temporal da medida de espessura de filme líquido.

Nesta seção de testes, para o cálculo da velocidade de propagação das ondas, utilizaram-se imagens com uma resolução de 512x1280 *pixels*, com a mesma ampliação aplicada para a extração de espessura de filme, o que resulta em uma calibração de 21,7 *pixel/*mm.

A Figura 5.6 ilustra um esquema da seção de testes de 50,8 mm de diâmetro para a melhor compreensão da região de interesse, configurações ópticas e resoluções aplicadas a cada caso estudado para obtenção das imagens longitudinais.



Figura 5.6 - Esquema das configurações ópticas aplicadas nos testes longitudinais para a seção de 50,8 mm de diâmetro.

A Tabela 5.1 resume as informações relativas à calibração espacial gerada por cada configuração óptica utilizada, assim como o tempo e a frequência de aquisição para captura de imagens utilizadas em cada experimento.

Diâmetro (mm)	Frequência (Hz)	Lente Objetiva (mm)	Resolução (<i>pixel</i>)	Tempo (s)	Calibração (<i>pixel</i> /mm)	Variável Medida
15,8	250	105	512 x 512	52,4	50,00	Espessura
15,8	3000	60	512 x 512	4,4	18,25	Velocidade
50,8	250	60	512 x 512	52,4	21,70	Espessura
50,8	3000	60	1280 x 512	4,4	21,70	Velocidade

Tabela 5.1 - Configurações ópticas utilizadas cada caso estudado.

A Figura 5.7 mostra uma sequência de imagens típicas do filme inferior obtida utilizando-se a técnica de *PLIF* desenvolvida. A sequência de imagens foi obtida com uma frequência de aquisição de 3000 quadros por segundo.



Figura 5.7 - Sequência de imagens longitudinais típicas do filme inferior obtidas a 3000Hz (sentido do escoamento da direita para esquerda).

O procedimento de processamento digital de imagens desenvolvido para identificar a região ocupada pelo filme líquido inferior em cada imagem será explicado na seção a seguir.

5.2. Processamento de Imagens Longitudinais

Devido ao elevado número de imagens adquiridas em cada caso estudado, os dados de espessura do filme foram obtidos por um procedimento automatizado baseado em um processamento digital de imagens. A tarefa das rotinas de processamento é fornecer a espessura do filme de líquido em uma ou mais posições axiais especificadas em cada quadro capturado pela câmera digital. Para que seja possível a realização das medições de espessura de filme, é necessário que as imagens sejam pré-processadas com o objetivo de melhorar o contraste da interface líquido-gás. Caso esta operação não seja realizada, a medição automatizada das espessuras pode fornecer erros consideráveis devido à pouca definição normalmente associada às imagens de escoamentos de mais de uma fase, ruídos e variação de intensidade luminosa.

O programa para realizar o processamento digital das imagens foi desenvolvido em linguagem MATLAB[®], desempenhando as tarefas descritas a seguir:

- a) Definição da posição e largura das sondas axiais de medição.
- b) Leitura das imagens originais capturadas pela câmera de alta velocidade.
- c) Pré-processamento através da equalização do histograma das imagens.
- d) Determinação da posição da parede interna do tubo.
- e) Binarização da imagem pré-processada.
- f) Avaliação da espessura do filme líquido na região de cada sonda de medição, através da identificação da fronteira gás-líquido na imagem binarizada.
- g) Aplicação da calibração nos resultados obtidos para a espessura do filme.

A seguir serão descritas as etapas de processamento de imagem realizadas pelo programa desenvolvido para extrair a espessura de filme líquido em cada quadro capturado.

5.2.1. Definição da Posição e Largura das Sondas de Medição

No presente trabalho a sonda de medição é definida como sendo a região em uma dada imagem digital do escoamento onde se realiza a medição da espessura do filme de líquido. O esquema da Figura 5.8 auxilia na definição da sonda. Na figura pode-se observar uma imagem esquemática de uma onda de líquido sobre a parede inferior do tubo, capturada pelo sensor digital da câmera. Os *pixels*, que representam a menor unidade de resolução do sensor digital, são mostrados esquematicamente como pequenos quadrados no fundo cobrindo todo o campo de visão da imagem. Cada uma das duas sondas mostradas na figura é indicada por um par de linhas verticais mais grossas ligando a parede inferior com a superior do tubo horizontal. As sondas possuem, respectivamente, larguras l_{s1} e l_{s2} , estando afastadas de uma distância axial d_s . A utilização de duas sondas decorre da necessidade de medição da velocidade de propagação das ondas, pelo método de correlação cruzada dos sinais de espessura de filme, que será explicado no Capítulo 7.

A espessura do filme líquido medida, h(t), é avaliada como a média da altura das colunas de *pixels* que definem a sonda de medição. A decisão se um dado *pixel* pertence ao líquido ou ao gás depende do método de binarização, como será descrito na Seção 5.2.4.



Figura 5.8 - Representação esquemática das sondas de medição da espessura do filme de líquido sobre uma imagem digitalizada.

Conforme observado em testes anteriores, verificou-se que a largura de sonda utilizada correspondendo à mínima possível – um *pixel* – produzia sinais de espessura de filme com variações bruscas, o que gerava um sinal com elevado nível de ruído. A largura da sonda funciona como um filtro espacial de média aplicado ao sinal de espessura do filme de liquido. A largura da sonda definida para o processamento de todos os casos estudados foi de 0,5 mm.

Deve-se mencionar que uma sonda física do tipo resistiva ou capacitiva possui também uma espessura finita, produzindo assim resultados integrados espacialmente na dimensão de sua espessura. Além disso, sondas físicas apresentam tempos de resposta finitos, o que limita a resolução temporal das variações de amplitude da espessura de filme de líquido que podem ser medidas. No caso das medições ópticas realizadas no presente trabalho, o tempo de resposta é definido pelo tempo de sensibilização dos sensores das câmeras digitais, que pode ser considerado desprezível quando comparado aos tempos característicos do fenômeno de passagem de onda em estudo.

5.2.2. Aumento de Contraste

Com o objetivo de melhorar o contraste da interface líquido-gás nas imagens adquiridas foi implementada uma rotina de pré-processamento em linguagem MATLAB[®] para equalização do histograma para cada imagem. A seguir será apresentada uma descrição breve da evolução no estudo de melhoria do pré-processamento das imagens e a descrição do procedimento utilizado.

O histograma de intensidade luminosa apresenta a distribuição da frequência de ocorrência de tons de cinza de uma dada imagem. Basicamente, o algoritmo desenvolvido realiza uma transformação não linear no histograma da imagem original que, em nossa aplicação, geralmente se apresentava comprimido, não utilizando toda a faixa de tons de cinza disponíveis no sensor da câmera. Além disso, devido à presença de múltiplas reflexões nas superfícies curvas que formam a interface gás-líquido, a imagem inevitavelmente apresenta pontos de extrema intensidade luminosa, o que dificulta a definição de um valor de limiar (*threshold*) adequado para operações de binarização da imagem. A Seção 5.2.4 dedica-se à descrição do processo de binarização. Além disto, as imagens capturadas algumas vezes apresentam regiões no filme de líquido mais escuras que outras. Isto pode ser explicado pelas imperfeições no material da

parede do tubo e variações espaciais da intensidade do plano de laser acarretando em variações no nível de cinza em algumas regiões das imagens.

Assim, a transformação implementada busca ajustar automaticamente os extremos de luminosidade de forma a distribuir igualmente os tons de cinza da imagem ao longo de toda a faixa dinâmica do sensor, saturando os máximos e mínimos de luminosidade, que passam a fornecer, na saída do processamento, os valores "1" e "0", respectivamente. O resultado desta transformação é uma imagem com melhor brilho e contraste acentuado, o que facilita na detecção da posição da interface líquido-gás.

A Figura 5.9 apresenta uma imagem típica do filme de líquido visualizada longitudinalmente utilizando a técnica *PLIF* juntamente com seu histograma de tons de cinza. Como pode ser visto no seu histograma, o número de *pixels* com valores acima de 0,7 é desprezível, com a maioria concentrada na faixa entre 0 a 0,6.

O processamento preliminar de imagem era baseado em filtros medianos espaciais para a redução de ruído nas imagens e preservação dos contornos do filme de líquido. Além disto, uma equalização adaptativa global do histograma da imagem era utilizada para realçar o contraste (MATLAB, 2008). Este processamento gerava uma imagem muito clara no centro e escura nas bordas, com o histograma bastante desbalanceado.



Figura 5.9 - Imagem original típica capturada e o histograma correspondente.





Como pode ser observado na Figura 5.10, o procedimento aplicado não resolveu o problema de não uniformidade na iluminação e a interface gás-líquido não apresentou melhor definição como o esperado.

O desbalanceamento do histograma das imagens pré-processadas foi corrigido por uma equalização de histograma, baseada em uma função sigmóide adaptativa. Esta função transforma os níveis de cinza acima e abaixo de valores pré-determinados para os níveis de cinza máximo e mínimo disponíveis no sensor da câmera, ou seja, "1" e "0", respectivamente. O histograma de nível de cinza da imagem resultante apresenta um maior número de *pixels* concentrados nos valores extremos, altos e baixos, com poucos *pixels* apresentando valores intermediários. Esse tipo de histograma facilita a determinação de um limiar para realizar a binarização, que se segue a esse processo.

Uma característica particular da equalização de histograma empregada neste trabalho foi à aplicação do processo em cada coluna da imagem, ao invés de em toda a imagem globalmente. Com isso, apenas os valores máximos e mínimos de cada coluna influenciam a equação de equalização da região. Desta forma, a equalização torna-se mais robusta e imune às variações de luminosidade no plano do laser e a outros possíveis defeitos de iluminação em diferentes pontos da imagem. A equação 5.1 abaixo descreve a curva aplicada, em cada coluna, nas imagens para equalização do histograma.

$$Iy = 0.5 + 0.5 \cdot \beta \cdot \left(\frac{e^{Ix} - e^{-Ix}}{e^{Ix} + e^{-Ix}}\right)$$
(5.1)

onde, os parâmetros β e l_x são dados pelas equações a seguir.

$$\beta = \frac{e^{\alpha} + e^{-\alpha}}{e^{\alpha} - e^{-\alpha}}$$
(5.2)

$$Ix = 2 \cdot \alpha \cdot (I - I_{med}) \tag{5.3}$$

O parâmetro α indica a inclinação da sigmóide, *I* é a intensidade de cinza de cada *pixel* da imagem original e I_{med} é dado pela equação:

$$I_{med} = b \cdot I_{max} + (1-b) \cdot I_{min}$$
(5.4)

onde, *b* indica o valor da abscissa onde a sigmóide é centrada, e I_{max} e I_{min} são respectivamente as intensidades máximas e mínimas dos *pixels* da coluna.

Como pode ser observado, I_{med} é então uma média da intensidade da coluna ponderada pelo parâmetro *b* da sigmóide escolhido. Variando-se os parâmetros α e *b* obtêm-se configurações diferentes da curva de equalização. O comportamento da curva com a variação de *b* e α é apresentado na Figura 5.11. Após vários testes, concluiu-se que uma equalização mais suave (α =4) apresentou melhores resultados.



Figura 5.11 - (a) Curva de equalização do histograma para α constante. (b) Curva de equalização do histograma para *b* constante.

Observando a curva de equalização das imagens, notou-se que, em algumas destas, a equalização não utilizava todos os níveis de cinza, ou seja,

intensidades de "0" a "1". Isso pode ser explicado uma vez que nem todas as imagens possuíam em todas as colunas as intensidades mínimas e máximas, valores "0" e "1", respectivamente. Para isso, um ajuste foi necessário para que a curva resultante fosse expandida para os valores extremos do histograma, garantindo uma perfeita equalização para toda gama de intensidade de cinza. A equação 5.5 abaixo descreve a correção de normalização aplicada à curva.

$$Iy_{norm} = (Iy - Lim_{med}) \cdot \varphi + 0,5$$
(5.5)

onde, I_y é a intensidade de cinza do *pixel* em uma determinada coluna dada pela equação 5.1. *Lim_{med}* e o fator de expansão, φ , são calculados pelas equações 5.6 e 5.7, respectivamente.

$$Lim_{med} = \frac{Lim_{sup} + Lim_{inf}}{2}$$
(5.6)

$$\varphi = \frac{1}{Lim_{\rm sup} - Lim_{\rm inf}} \tag{5.7}$$

onde, Lim_{inf} é o mínimo de intensidade de cinza de I_y e Lim_{sup} é o máximo de intensidade de cinza de I_y .

A Figura 5.12 ilustra a comparação entre a curva de equalização sem normalização, em vermelho, e a curva de equalização normalizada, em verde. Pode-se observar que a curva de equalização sem normalização, não expandiu os níveis de cinza da imagem original para os extremos de intensidade "0" e "1".



Figura 5.12 - Comparação entre a curva de equalização do histograma com e sem normalização.

A Figura 5.13 apresenta a curva de equalização de histograma aplicada à imagem ilustrada na Figura 5.9. A abscissa se refere às intensidades de cinza de uma dada coluna da imagem original e a ordenada indica a correspondência deste valor após a equalização do histograma.



Figura 5.13 - Curva de equalização do histograma utilizada na imagem da Figura 5.9 para α =4 e *b*=0,5.

Como pode ser observado na Figura 5.14, a imagem após aplicação de equalização, correspondente a curva da Figura 5.13, em todas as colunas revelou-se mais nítida e com a interface gás-líquido mais bem definida. Nota-se também que o histograma da imagem resultante distribuiu-se em toda gama de níveis de cinza, entre "0" e "1", conforme o desejado.

Entretanto, surgiram algumas franjas escuras na Figura 5.14 devido a picos de intensidade de cinza em regiões restritas ou pontuais nestas colunas. Estes pontos fazem com que a sigmóide de equalização do histograma desvalorize o maior número de pontos, que possuem intensidade de cinza mais baixa, escurecendo a coluna. Isto acontece, pois o procedimento de cálculo utiliza o valor máximo e mínimo de intensidade para projetar a curva. Às vezes estes valores extremos são iluminações abruptas ou *pixels* superexpostos pela iluminação que acabam desviando a curva desvalorizando o filme de líquido, região que realmente interessa.



Figura 5.14 - Imagem processada utilizando a função sigmóide adaptativa para equalização do histograma por coluna e o seu histograma correspondente.

Para corrigir o problema das franjas foi criado um filtro de duas etapas. Na primeira etapa, o valor máximo da intensidade na equação 5.4, I_{max} , em cada coluna é substituído por I_{max}^* . Este parâmetro é dado pelo mínimo entre os valores de intensidade máxima das *n* colunas adjacentes (*n*/2 colunas anteriores e *n*/2 colunas posteriores, ou seja, filtro de banda *n*/2). Na segunda etapa, o valor da intensidade máxima da coluna para a equação da sigmóide de equalização, é substituído por I_{max}^{**} . Este parâmetro é dado pela média dos *m* máximos adjacentes (filtro passa baixa de banda *m*/2) de I_{max}^{**} , obtidos na primeira etapa. A equação para I_{med} torna-se então:

$$I_{med} = b \cdot I_{max}^{**} + (1-b) \cdot I_{min}$$
(5.8)

A primeira etapa elimina as franjas, enquanto a segunda torna a transição de níveis de cinza entre as colunas mais suave. A Figura 5.15 apresenta em azul os valores máximos das intensidades de cinza de cada coluna para toda a imagem original. A curva em vermelho, na mesma figura, se refere ao resultado do processamento utilizando os valores máximos das intensidades, I_{max}^{**} , utilizados na equação para a equalização de cada coluna. Pode-se observar que houve uma suavização dos valores máximos de intensidade garantindo uma melhora na transição da equalização entre colunas. Após alguns testes, os valores de *n* e *m* que obtiveram melhores resultados para o filtro do procedimento de pré-processamento das imagens foram 10 e 30, respectivamente.



Figura 5.15 - Filtro aplicado a cada coluna da imagem da Figura 5.9 para redução de franjas.

A Figura 5.16 mostra o efeito na imagem depois da aplicação da equalização do histograma utilizando a função e o filtro nas colunas descritos acima e seu histograma correspondente. O contraste da imagem aumentou significativamente, e uma binarização pode ser facilmente realizada, como será mostrado na Seção 5.2.4, uma vez que limiar de corte pode ser identificado na região central do histograma.



Figura 5.16 - Imagem equalizada com função sigmóide em cada coluna da imagem após a utilização do filtro para suavização das franjas e o histograma correspondente.

Com o objetivo de diminuir o tempo de computação, optou-se por realizar a operação de equalização de histograma somente nas regiões da imagem que foram previamente selecionadas como sendo as regiões das sondas de medição. Na região retangular que define cada sonda de medição, a operação de equalização do histograma era realizada sobre cada coluna que compunha a largura da sonda, possibilitando que a interface ficasse mais ressaltada, independentemente da diferença de iluminação da imagem global.

5.2.3. Determinação da Posição da Parede Interna do Tubo

A determinação em *pixels* da parede do tubo também era informação essencial para o programa. Esta posição se refere ao início da contagem de espessura de filme líquido. Para determinar este valor, uma imagem típica do escoamento era capturada e, com o software de edição de imagem, *ImageJ*[®], a medição em *pixels* da parede interna do tubo era realizada.

5.2.4. Medição da Espessura de Filme

A medição da espessura de filme líquido era realizada em imagens previamente equalizadas (pré-processadas) e binarizadas. A binarização consiste na escolha de um valor limite para a intensidade do nível de cinza da imagem (*threshold*) acima do qual os *pixels* passam a ter valor lógico "1", sendo associados à fase líquida. Os *pixels* com níveis de cinza inferiores ao limiar de corte recebem o valor lógico "0", sendo associados à fase gasosa.

O processo de binarização acarreta em variações abruptas da posição da interface, uma vez que escolhas diferentes para o valor limite de binarização implicam em mudanças discretas no cálculo de espessura do filme. Por isto, como já foi mencionado na seção anterior, o pré-processamento das imagens é de extrema importância, pois transforma o histograma da imagem original de forma que tons de cinza fiquem concentrados nos valores extremos (Figura 5.16). Sendo assim, uma ligeira variação do limiar de corte para a binarização, próximo à região central, não influencia significativamente na determinação da posição da interface.

Com as imagens já binarizadas, o cálculo da espessura é realizado, em cada coluna de *pixels* que forma a sonda de medição, somando-se todos os *pixels* de valor "1" a partir da posição da parede inferior do tubo, até que seja encontrado o primeiro valor lógico "0", correspondente à fase gasosa. O valor da espessura do filme em cada sonda de cada imagem é calculado como a média da espessura, em *pixels*, de todas as colunas que compõem a região da sonda. Esse processo é realizado em todas as imagens capturadas, gerando a variação temporal da espessura, h(t), para cada sonda de medição.

Para amenizar o problema da escolha do limiar de binarização para cada experimento, que anteriormente era fixo e subjetivo, este passou a ser iterativo. Escolhem-se algumas imagens do experimento para que sejam os padrões típicos, indica-se a posição da interface gás-líquido visualmente pelo usuário no ponto escolhido como sonda. A interface para cada imagem na sonda é calculada pelo programa, através de um cálculo iterativo de espessura de filme para diferentes valores de limiar, e seus erros com relação ao padrão são computados. O valor do limiar final é dado pela média aritmética dos limiares de cada imagem que obtiveram melhor aproximação da espessura de filme padrão, ou seja, menor erro.

É comum em imagens de filmes de escoamentos anulares a presença de bolhas de gás no filme de líquido. Estas bolhas apresentam na imagem níveis de cinza equivalentes ao da fase gasosa, que quando binarizada passam a ter nível lógico "0". Este fato pode acarrretar em uma determinação incorreta da posição da interface, pois o algoritmo pararia a contagem da espessura de filme líquido, quando a bolha fosse encontrada. Por esta razão, antes de ser iniciada a contagem vertical dos *pixels* com nível lógico "1" em uma dada coluna, utilizavase um algoritmo para o preenchimento de vazios na imagem. Este algoritmo identifica regiões fechadas com nível de cinza zero dentro filme e as preenche com o valor lógico "1", correspondente à fase líquida. Assim, após este procedimento, o filme apresenta-se de forma contínua permitindo a medição de sua espessura. Neste trabalho utilizou-se uma função da biblioteca do MATLAB[®] denominada *imfill* para realizar a tarefa de preenchimento das regiões de bolhas no filme.

A média da espessura do filme líquido foi obtida através da média temporal da espessura de filme h(t) em todo período de aquisição. Este valor contabiliza as grandes ondas, opondo-se ao critério adotado para a estimativa dos valores de espessura de filme líquido reportados por Schubring & Shedd (2009a), que apenas considera a variação de espessura do filme base. O desvio médio quadrático da espessura média de filme, valor *RMS*, foi calculado para complementar a caracterização estatística do escoamento.

A Figura 5.17(a) mostra a imagem resultante da operação de binarização utilizada aplicada à Figura 5.17, com um limiar de corte apropriado. Na Figura 5.17(b), uma linha vermelha, correspondente à espessura de filme líquido calculada pelo programa, foi superposta à imagem original, apresentada na Figura 5.9, para verificação. A concordância obtida é considerada excelente. As manchas brancas sobre o filme líquido, mas não conectadas a ele, são imagens de líquido fora do plano e não devem ser computadas como fazendo parte do filme de líquido.



Figura 5.17 - (a) Imagem binarizada (b) Espessura de filme líquido medida superposta à imagem original.

A sequência de imagens da Figura 5.18 mostra a passagem de uma onda. Também podem ser vistos na figura dois marcadores, vermelho e azul, na interface ar-água. Esses são as espessuras de filme medidas pelo algoritmo de

97

processamento das imagens desenvolvido aplicado nas localizações das sondas. Esses marcadores foram superpostos às imagens originais para verificar a concordância com a interface identificada visualmente.

É importante mencionar que a observação da concordância dos marcadores com todas as imagens originais capturadas foi parte do procedimento experimental, onde pequenos desvios da posição da interface medida em relação à posição correta podiam ser facilmente identificados. Uma grande quantidade de quadros apresentando desvios seria um indicativo de escolha ruim dos parâmetros de pré-processamento e binarização das imagens. O número de imagens com desvios, entretanto, foram desprezíveis.

Recomeda-se ao leitor interessado acessar os Vídeos 1 e 2 em anexo à versão eletrônica da presente dissertação, disponível na biblioteca digital da PUC-Rio. As imagens da Figura 5.18 foram retiradas do Vídeo 1, que fornece informações riquíssimas sobre a dinâmica do escoamento anular, ainda não disponíveis na literatura internacional.



Figura 5.18 - Imagens longitudinais do filme líquido em função do tempo. Cruzes vermelha e azul indicam as espessuras de filme determinadas pelo procedimento de processamento de imagem desenvolvido.

A Figura 5.19 mostra um exemplo típico da variação temporal da espessura de filme líquido inferior obtido pelo programa de processamento de imagens. Este resultado corresponde à espessura de filme medido na região da sonda 1, para as velocidades superficiais de líquido e gás de 0,112 e 20 m/s, respectivamente. A presença de grandes ondas, *disturbance waves*, e de pequenas ondas de maior frequência, *ripples*, pode ser identificada em dados como os apresentados na figura.



Figura 5.19 - Exemplo típico da variação temporal da espessura de filme líquido inferior determinado pelo procedmento de processamento de imagens desenvolvido ($U_{sl}=0,112$ m/s e $U_{sg}=20$ m/s).

6 Experimentos para Medição Transversal do Filme de Líquido

Com base nos resultados da aplicação bem sucedida da técnica *PLIF* na visualização longitudinal para determinação da variação temporal do filme de líquido inferior formado pelo escoamento anular horizontal, uma nova configuração foi proposta. Esta nova configuração objetiva obter a informação instantânea do filme de líquido na seção transversal do escoamento.

Neste capítulo serão descritos os procedimentos adotados para a realização dos experimentos estereoscópicos e o processamento digital de imagem elaborado para a extração de informações qualitativas e quantitativas do comportamento temporal do filme líquido na seção transversal do tubo.

6.1. Aquisição das Imagens Transversais

Essa seção dedica-se à apresentação dos procedimentos utilizados para a realização da visualização da seção transversal do escoamento. Aspectos relacionados ao alinhamento óptico, acionamento dos equipamentos, calibração da imagem e realização do experimento serão apresentados.

6.1.1. Acionamento dos Equipamentos

O preparo inicial para o acionamento e configuração dos equipamentos como laser, sincronizador e câmeras foram os mesmos utilizados para a visualização longitudinal, descritos anteriormente no Capítulo 5. Porém, alterações foram realizadas no arranjo óptico para aplicação da técnica de visualização em configuração estereoscópica.

Imagens da seção transversal do filme líquido foram obtidas pela montagem óptica empregando duas câmeras de alta velocidade montadas em ângulo, como ilustrado no esquema da Figura 6.1. Neste caso, o plano de luz foi girado de 90°, em relação à configuração para visua lização longitudinal, para iluminar a seção transversal do tubo.



Figura 6.1 - Montagem óptica estereoscópica para a visualização da seção transversal do escoamento.

Duas câmeras *IDT Motion X3* foram montadas em um suporte giratório graduado permitindo que o ângulo de cada câmera fosse ajustado a 45° em relação ao eixo do tubo, observando a seção transversal do escoamento através de duas janelas inclinadas disponíveis na caixa de visualização. As faces das janelas da caixa de visualização foram projetadas para que as lentes objetivas das câmeras fossem ortogonais a estas, como explicado na Seção 4.1.6.3. O suporte da câmera também permitia que o corpo da câmera e seu sensor de imagem, fossem deslocados angularmente em relação ao eixo da lente que era mantido fixo a 45° com o eixo do tubo. Essa montagem permitiu a obtenção da chamada condição de *Scheimpflug* (Raffel et al., 2007). Esta condição é obtida quando os planos da lente, do CCD da câmera e do plano formado pelo feixe do laser se encontram em uma única linha. Quando esta condição óptica é alcançada, consegue-se que toda a imagem esteja em foco, apesar da câmera estar observando a seção transversal do tubo em ângulo.

6.1.2. Calibração das Imagens

Para realizar o processo de calibração da imagem, um alvo era inserido no tubo de teste de *FEP*, tendo sua face alinhada com o plano do laser. O alvo, mostrado na Figura 6.2, foi fabricado a partir de um cilindro de latão com

comprimento de 1 m. Uma malha padrão de pontos com espaçamentos regulares de 1,5 mm foi usinada na face do alvo, que foi posteriormente anodizada na cor preta. Os pontos da malha, com diâmetro de 0,5 mm, foram depois pintados de branco para produzir um bom contraste com o fundo anodizado em preto.



Figura 6.2 - Alvo para calibração de imagens estereoscópicas com destaque para a malha de pontos usinada e pintada de branco.

A Figura 6.3 ilustra o alvo de calibração posicionado dentro da caixa de visualização, alinhado com o plano do laser, sendo observado em ângulo através da janela lateral da caixa de visualização.



Figura 6.3 - Alvo de calibração posicionado dentro do tubo de testes e alinhado com o plano do laser.

O tubo de testes era então enchido com a mesma solução de água e rodamina usada nos testes e uma imagem do alvo era capturada com cada uma das câmeras, utilizando uma fonte de luz contínua externa de uma lâmpada fluorescente. As imagens apresentadas na Figura 6.4 são visualizações em ângulo da malha de pontos da face do calibrador dentro do tubo preenchido totalmente com a solução, obtidas pelas câmeras da esquerda e da direita.



Figura 6.4 - Alvo de calibração posicionado dentro da seção de testes preenchida com a solução de água e rodamina. Imagens capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita.

Um procedimento automático foi desenvolvido para distorcer as imagens obtidas com cada uma das câmeras. Após a distorção, as imagens apresentam uma visão equivalente àquela que seria obtida por uma câmera hipoteticamente situada no eixo da tubulação, observando frontalmente a seção reta do tubo. O procedimento de distorção, que será descrito na seção 6.1.3, gera um polinômio de distorção para cada câmera, que depois é aplicado em todas as imagens capturadas.

Após a distorção das imagens, uma operação de união das imagens da esquerda com a da direita era realizada formando a imagem completa da seção do tubo. As operações de união e pré-processamento das imagens serão descritas mais detalhadamente na Seção 6.2.4.

6.1.3. Procedimento de Distorção das Imagens de Calibração

Depois de capturadas as duas imagens do alvo, dois polinômios de distorção de imagens, um para a câmera da esquerda e outro para a da direita, eram obtidos através do procedimento de calibração. Nesta seção serão descritos os procedimentos adotados para a determinação destes polinômios.

O polinômio de distorção promove um mapeamento da imagem distorcida vista em ângulo para uma imagem frontal da seção reta do tubo. Essa rotina de distorção de imagens foi desenvolvida em linguagem MATLAB[®] com o auxílio do professor Raul Feitosa do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-RIO, utilizando o método de *Random Sample Consensus*, *RANSAC* (Fischler & Bolles, 1981).

RANSAC é um método iterativo para estimar parâmetros matemáticos de um modelo a partir de dados observados. É um algoritmo não determinístico proposto inicialmente por Fischler & Bolles (1981) que produz resultados razoáveis dependendo do número de iterações permitidas. Basicamente, assume-se que os dados observados consistem de pontos *inliers* – cuja distribuição pode ser explicada pelos parâmetros do modelo – e *outliers* – pontos classificados como ruído, incorretamente medidos ou com erro na interpretação dos dados. Este método é usualmente empregado em visão computacional para resolver, por exemplo, problema de correspondência na estimativa da matriz fundamental relacionada com o par de câmeras em configuração estereoscópica, como neste trabalho.

Em linhas gerais o método *RANSAC* pode ser resumido da seguinte forma:

- a) Inicialmente alguns pontos são selecionados aleatoriamente dentre aqueles observados.
- b) Estes pontos, considerados hipoteticamente *inliers*, são utilizados para um ajuste inicial do modelo através de transformação linear direta.
- c) Todos os demais pontos são testados contra o modelo ajustado. Caso um determinado ponto se ajuste bem a este modelo, ele também passa a ser classificado como hipoteticamente *inlier*.
- d) O modelo é então reestimado com todos os pontos classificados como inliers.
- e) Finalmente o ajuste é avaliado através do erro estimado entre os pontos hipoteticamente *inliers* e o modelo ajustado.

- f) O procedimento de (a) a (e) é repetido, determinado número de vezes, produzindo diferentes modelos ajustados.
- g) O modelo com menor erro e maior número de pontos hipoteticamente inliers é considerado o melhor ajuste para os pontos observados.

As imagens originais capturadas da esquerda e da direita do alvo apresentam-se deformadas devido ao ângulo de observação de cada câmera, como apresentado na Figura 6.4 acima. Em cada uma destas duas imagens os pontos da malha de calibração, pontos do domínio, são selecionados pelo usuário, como exemplificado em vermelho na Figura 6.5 para a imagem capturada pela câmera da esquerda. Estes pontos possuem correspondentes na imagem distorcida, pontos do contradomínio. Através do conhecimento do espaçamento real entre os centros dos pontos no alvo de calibração, ponto do contradomínio, uma matriz de transformação linear, para cada uma das câmeras, é obtida através do método de *RANSAC*. Esta matriz é responsável por distorcer a imagem levando os pontos do domínio nos pontos contradomínio. A Figura 6.6 apresenta a imagem do alvo visualizado pela câmera da esquerda da Figura 6.4 distorcida através do polinômio de calibração gerado pelo procedimento implementado.



Figura 6.5 - Imagem do alvo de calibração com destaque para os pontos vermelhos referentes a seleção feita pelo usuário.



Figura 6.6 - Imagem do alvo de calibração distorcido após a aplicação do polinômio de distorção.

A Figura 6.7 apresenta o alvo distorcido com pontos em azul marcados. Estes pontos representam os pontos vermelhos da Figura 6.5 projetados na imagem já distorcida. Pode-se observar que houve uma boa concordância entre todos os pontos projetados e a imagem do contradomínio.



Figura 6.7 - Imagem do alvo de calibração com destaque nos pontos azuis que são projeções dos pontos anteriormente marcados pelo usuário em uma imagem com observação em ângulo.

6.1.4. União das Imagens de Calibração

Após a distorção das imagens da direita e da esquerda, era aplicado um processo de união para formar a imagem completa instantânea da seção transversal do filme de líquido ao longo da parede do tubo.

Um perfeito alinhamento entre as duas câmeras não podia ser garantido. Por esta razão, as imagens capturadas pelas duas câmeras não apresentavam seus centros coincidentes entre si e também com o eixo do tubo. Para assegurar a perfeita união das imagens da esquerda e da direita, as coordenadas das posições do centro do alvo de calibração (losango) nas duas imagens distorcidas, eram registradas e serviam de guia para a uma correta sobreposição das imagens.

No processo de união das imagens a intensidade de cinza da imagem resultante era obtida pela média aritmética das intensidades de cinza das imagens da esquerda e da direita em cada posição correspondente. Após a imagem ter sido unida, era realizada uma equalização de histograma global para aumentar o brilho e o contraste, uma vez que o procedimento de união tende a escurecer a imagem. A Figura 6.8 mostra as imagens do alvo já distorcidas da esquerda e da direita, enquanto a Figura 6.9 apresenta a imagem resultante após o processo de união.



Figura 6.8 - Imagens do alvo de calibração da esquerda e da direita já distorcidas.



Figura 6.9 - Imagem do alvo de calibração resultante da união entre as imagens distorcidas obtidas com as câmeras da esquerda e da direita.
É relevante mencionar que as condições de calibração usando o tubo completamente preenchido com solução de água e rodamina são distintas das condições de escoamento. Nestas condições, o filme líquido escoa ao redor do tubo e o ar, carregado de gotículas, no centro. Devido às diferenças de caminho óptico entre a água e o ar, a imagem obtida por uma câmera, digamos a da direita, captura o filme de líquido na parede da direita e também na parede oposta do tubo, a parede esquerda. No entanto, a imagem da parede oposta é obtida através de um caminho óptico que inclui água e ar. Este caminho óptico é distinto daquele presente no processo de calibração, onde o tubo está totalmente preenchido com a solução de água e rodamina. Por esta razão, nos experimentos realizados, a imagem da parte direita do filme de líquido era capturada pela câmera direita e a parte esquerda do filme era capturada pela câmera esquerda.

A calibração da imagem em *pixel/mm* foi também calculada com o programa de edição de imagem *ImageJ*®, através da medição em *pixels* do espaçamento real conhecido entre os pontos do alvo da imagem resultante do processo de união, analogamente ao que foi descrito para a calibração da imagem longitudinal.

6.1.5. Captura das Imagens

Com o calibrador retirado do interior do tubo, os experimentos com o escoamento anular eram realizados. Estas imagens gravadas tinham resolução de 1024x1280 *pixels*, para permitir que toda a imagem da seção reta do tubo fosse capturada. Estas imagens, devido ao ângulo de observação de cada câmera, eram distorcidas e unidas pelos procedimentos descritos anteriormente. As imagens foram capturadas com uma configuração de componentes ópticos que fornecia uma resolução de 57,3 *pixel*/mm.

Os ajustes da vazão de água e ar para as condições de operação, assim como os processos de alinhamento da seção de testes, seguiram os mesmos procedimentos adotados para o caso do arranjo preparado para a visualização longitudinal do filme de líquido. As velocidades superficiais escolhidas para estes testes foram as mesmas utilizadas nos testes longitudinais para a seção de 15,8 mm, de modo a permitir a comparação entre as duas técnicas de medição. A matriz de testes investigada é apresentada no Capítulo 8. As imagens longitudinais demonstraram que a ampliação gerada por uma resolução espacial de 512x512 *pixels* apresentava uma incerteza aceitável na medição do filme líquido, uma vez que apenas a região entre a parte inferior do tubo e a linha de centro do mesmo foi registrada. Entretanto, no caso da visualização da seção transversal do filme, cada câmera capturava a metade da seção transversal do tubo. Para garantir uma ampliação próxima àquela utilizada no arranjo longitudinal, e, ao mesmo tempo visualizar toda a região de interesse, foi necessário utilizar a máxima resolução espacial fornecida pela câmera, 1024x1280 *pixels*. Com essa resolução espacial, a memória da câmera permitia que 6550 imagens fossem armazenadas, o que corresponde, para a frequência de aquisição de 250 Hz, a um registro máximo de 26 s para cada teste conduzido.

A Figura 6.10 apresenta as imagens do filme de líquido visualizado em ângulo pelas câmeras da esquerda e da direita. Cada câmera fornece então metade do escoamento da seção transversal no interior do tubo.



Figura 6.10 - Imagens observadas em ângulo do filme de líquido capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita.

A Tabela 6.1 resume as informações relativas à calibração espacial gerada por cada configuração óptica, o tempo e a frequência de aquisição para captura cada experimento.

Frequência (Hz)	Lente (mm)	Resolução (px)	Tempo (s)	Calibração (px/mm)
250	60 + anéis	1280 x 1024	26,2	57,3
2000	60 + anéis	1280 x 1024	3,3	57,3

Tabela 6.1 - Configurações ópticas utilizadas cada caso estudado.

O procedimento de processamento digital de imagens utilizado para distorcer as imagens e identificar a região ocupada pelo líquido na imagem transversal resultante será descrito com detalhes na Seção 6.2.

6.2.

Processamento das Imagens Transversais do Filme de Líquido

Serão descritos nesta seção os procedimentos de processamento automático empregados nas imagens transversais capturadas para determinação da distribuição circunferencial instantânea da espessura do filme líquido. As principais etapas realizadas pelo programa desenvolvido são:

- a) Definição da posição e largura da sonda de medição.
- b) Leitura das imagens originais capturadas pela câmera.
- c) Equalização global do histograma das imagens da esquerda e da direita.
- d) Distorção das imagens através dos polinômios obtidos na calibração.
- e) União das imagens da esquerda e da direita e equalização global do histograma da imagem resultante.
- f) Determinação da posição circunferencial da parede interna do tubo.
- g) Avaliação da espessura de filme na sonda de medição através da identificação da fronteira gás-líquido na imagem binarizada.
- h) Aplicação da calibração na espessura de filme.

6.2.1. Definição da Posição e Largura da Sonda de Medição

Como já mencionado anteriormente, a sonda de medição é definida como sendo a região em uma dada imagem do escoamento onde se realiza a medição da espessura do filme líquido. A Figura 6.11 auxilia na definição da sonda na imagem transversal do escoamento.

Na Figura 6.11 pode-se observar a imagem transversal esquemática de uma onda de líquido no interior do tubo. Os *pixels*, que representam a menor unidade de resolução do sensor digital, são mostrados esquematicamente como pequenos quadrados no fundo cobrindo todo o campo de visão da imagem. A sonda, de largura I_s , é indicada por um par de linhas verticais mais grossas ligando a parede inferior com a superior do tubo horizontal. A espessura do filme medida, h(t), é avaliada como a média da altura de cada coluna de *pixels* que define a sonda de medição. A decisão se um dado *pixel* pertence ao líquido ou ao gás depende do método de binarização, como já descrito na Seção 5.2.4, para o caso de uma imagem longitudinal do escoamento.



Figura 6.11 - Representação esquemática da sonda para medição da espessura do filme de líquido sobre imagem digitalizada.

6.2.2. Procedimento para Aumento do Contraste das Imagens

O pré-processamento aplicado nas imagens de filme líquido capturadas pelas câmeras da esquerda e da direita era iniciado através da aplicação de um procedimento de equalização de histograma global em ambas as imagens. Esta equalização ajustava automaticamente os extremos de luminosidade para a imagem como um todo de forma a distribuir igualmente os tons de cinza da imagem ao longo de toda a faixa dinâmica de "0" a "1" do sensor e amenizando possíveis discrepâncias de iluminação entre as câmeras. Isto era necessário uma vez que as duas imagens apresentavam diferentes distribuições de níveis de cinza em virtude de diferenças de iluminação.

6.2.3. Distorção das Imagens

Na Seção 6.1.2 foi descrito o procedimento adotado para obtenção do polinômio de calibração para distorção das imagens do alvo calibração. Estes polinômios, referentes ao alvo capturado pelas câmeras da esquerda e da direita, eram aplicados então em cada par de imagens que compunha a seção transversal do escoamento. A Figura 6.12 ilustra as imagens resultantes após o procedimento de distorção aplicado nas imagens da Figura 6.10.



Figura 6.12 - Imagens instantâneas distorcidas do filme líquido obtidas pelas câmeras da esquerda e da direita.

6.2.4. União das Imagens

O par de imagens já distorcidas das câmeras da direita e esquerda era então unido seguindo os procedimentos descritos na Seção 6.1.4. Desta forma, a imagem transversal instantânea do filme de líquido era formada. A intensidade de cinza da imagem resultante era obtida pela média aritmética das intensidades de cinza das imagens da esquerda e da direita nas posições correspondentes.

Diferentemente do que foi adotado no procedimento para melhoria do contraste das imagens longitudinais na Seção 5.2.2, um procedimento de equalização de histograma global era aplicado também na imagem da seção transversal resultante. Um exemplo de imagem resultante após a distorção e união pode ser visto na Figura 6.13.



Figura 6.13 - Imagem instantânea típica do filme de líquido no escoamento anular horizontal após a distorção e união das imagens capturadas pela câmera da esquerda e da direita.

6.2.5. Aplicação da Máscara Externa

Após o processo de distorção e união das imagens da câmera da esquerda e da direita, a imagem instantânea da seção transversal estava completa. Porém, observava-se a existência de "fantasmas" externos ao tubo decorrentes de sinais de fluorescência de porções de filme de líquido em posições a montante da posição do plano de luz laser. Estas imagens espúrias eram removidas através da aplicação de uma máscara sobre todas as imagens. Esta máscara era construída a partir de imagens de tubo cheio de líquido capturadas pelas duas câmeras. Estas duas imagens eram distorcidas e unidas, conforme o procedimento já apresentado. A Figura 6.14 apresenta a seção transversal do tubo preenchido com a solução de água e rodamina reconstruída.



Figura 6.14 - Imagem do tubo cheio da solução de água e rodamina distorcida e unida.

A máscara ilustrada na Figura 6.15 foi criada a partir da imagem da Figura 6.14. Através da binarização desta imagem foi possível ajustar um círculo que melhor circunscrevesse os *pixels* de nível lógico "1", ou seja, a região interna do tubo preenchida de líquido. Na máscara, a área branca corresponde à região de interesse – delimitada pela parede interna do tubo – e a preta, a região fora do tubo, que deve ser desconsiderada.



Figura 6.15 – Máscara criada a partir das imagens do tubo cheio.

Na Figura 6.16 é mostrada uma sequência de imagens típicas do filme de líquido após a aplicação da máscara. É possível perceber que apenas a região de interesse, a parte interna do tubo, foi mantida. Deve ser ressaltado que a aplicação da máscara é apenas uma operação cosmética, sem nenhum efeito na espessura do filme capturada dentro do tubo.

Recomeda-se ao leitor interessado acessar o Vídeo 3 em anexo à versão eletrônica da presente dissertação, disponível na biblioteca digital da PUC-Rio. As imagens apresentadas na Figura 6.16 foram retiradas deste vídeo, que fornece informações riquíssimas sobre a dinâmica do filme de líquido, informações ainda não disponíveis na literatura internacional.



Figura 6.16 - Sequência de imagens instantâneas típicas do filme de líquido após a aplicação da máscara.

6.2.6. Determinação da Espessura de Filme Líquido

A espessura de filme líquido era determinada na região da sonda nas imagens unidas após a aplicação da máscara como representado esquematicamente na Figura 6.11. Nesta região, primeiramente, o histograma era equalizado por coluna, de forma análoga ao caso longitudinal, apresentado na Seção 5.2.2. A sonda equalizada era então binarizada e a espessura de filme líquido extraída através da soma de *pixels* de valores lógicos "1", seguindo o mesmo critério descrito na Seção 5.2.4. A contagem era iniciada a partir da posição interna do tubo, definida pela máscara.

Este procedimento era realizado para uma sonda fixa sempre localizada a zero graus como esquematizado na Figura 6.11. Portanto, as espessuras de filme líquido em outras posições circunferenciais foram obtidas aplicando-se uma

116

transformação de rotação na imagem e sempre medindo a espessura do filme na posição inferior.

6.3. Teste de lluminação

Na visualização da seção transversal do tubo, foram realizados vários testes de iluminação para definir a posição de entrada do plano de laser na seção de testes. A iluminação deveria ser suficiente para fluorescer o filme líquido em toda a circunfencia do tubo.

Inicialmente, o feixe incidia na caixa de visualização de baixo para cima. Essa configuração gerava imagens com uma boa iluminação do filme líquido inferior, mas não tinha energia suficiente para excitar o filme líquido em outras posições circunferenciais.

Para aumentar a fluorescência e conseguir visualizar o filme em outras posições cirunferenciais, foram realizadas tentativas de iluminar o escoamento incidindo o feixe lateralmente à caixa de visualização, sem o uso de espelhos. Esta configuração embora tivesse um potencial de uniformizar a energia tanto na parte inferior e superior, quanto na lateral do tubo, permitiu apenas que metade da seção transversal fosse iluminada.

Finalmente, foi utilizada uma configuração em que o plano de laser era incidido pela face superior da caixa de visualização. Nesta montagem, todo o escoamento ficou bem iluminado, uma vez que o filme líquido superior, de menor espessura, recebia primeiramente a iluminação com a máxima energia. A energia do laser diminui quando atravessa caminhos ópticos de diferentes índices de refração. Ao passar pelo filme líquido superior e pelo núcleo de gás, a energia que excita o filme inferior é menor do que a incidente. Entretanto, o filme líquido inferior, por ter maior espessura, possui mais fluorescência e mesmo com menos energia no feixe, pode ser excitado. A montagem óptica está sendo modificada para produzir uma iluminação mais uniforme, que vai permitir uma melhor iluminação em toda a seção transvresal do tubo. Uma alternativa ainda não testada foi a utilização de um divisor de feixe para iluminar tanto pela parte inferior quanto pela parte superior.

A Figura 6.17 ilustra imagens capturadas com (a) iluminação inferior, (b) lateral e (c) superior à caixa de visualização.



Figura 6.17 - Imagens obtidas com iluminação (a) inferior, (b) lateral e (c) superior

7 Extração de Dados Quantitativos

A técnica de medição desenvolvida e descrita nos capítulos anteriores produz como resultado a variação temporal da espessura de filme de líquido em posições axiais definidas ao longo do tubo. No caso do arranjo óptico longitudinal da técnica, a variação da espessura é determinada em uma dada posição axial, enquanto a versão estereoscópica da técnica produz informações sobre a variação temporal do filme em diversas posições ao longo da circunferência do tubo. A Figura 7.1 reproduz, a título de ilustração, um resultado típico da variação temporal da espessura de filme obtido pela técnica longitudinal e já apresentado no Capítulo 5.



Figura 7.1 - Exemplo típico da variação temporal da espessura de filme líquido inferior determinado pelo procedimento de processamento de imagens desenvolvido ($U_{sl}=0,112$ m/s e $U_{sg}=20$ m/s).

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados para extrair informações estatísticas e espectrais dos sinais de variação temporal da espessura do filme de líquido, como aqueles apresentados na figura anterior. Os resultados de espessura média e valor médio quadrático do filme de líquido, determinação da velocidade de propagação das ondas, espectro de frequências do sinal de espessura e histograma serão apresentados no Capítulo 8.

7.1. Espessura Média do Filme de Líquido

A espessura média do filme de líquido foi determinada pela média temporal da espessura de filme, h(t), para todo o registro do sinal capturado, de acordo com a equação:

$$\overline{h} = \frac{\sum_{i=1}^{N} h_i}{N}$$
(7.1)

onde, N é o número de imagens e h_i é a espessura de filme líquido medida em cada quadro capturado.

7.2. Média Quadrática da Espessura de Filme de Líquido – *RMS*

O valor médio quadrático da espessura do filme de líquido, valor *RMS*, foi determinado a partir do sinal de espessura de filme, h(t), utilizando-se a equação:

$$h_{RMS} = \sqrt{\sum_{1}^{N} \frac{(h_i - \bar{h})^2}{N}}$$
(7.2)

7.3. Velocidade de Propagação das Ondas de Líquido

A velocidade das ondas do filme de líquido foi determinada a partir da correlação cruzada de dois sinais simultâneos de espessura de filme medidos em duas posições axiais espaçadas de uma distância, *d*_s, pré-determinada. A Figura 5.8 ilustra esquematicamente o posicionamento das duas sondas na imagem capturada. A velocidade da onda em m/s, *v*, é determinada pela razão entre o espaçamento entre as sondas de medição, *d*_s, e o tempo de trânsito das ondas, *t*. O tempo de trânsito é avaliado computando-se o atraso correspondente ao valor máximo da função de correlação cruzada dos sinais de espessura de filme capturados nas posições das duas sondas de medição (Bendat & Piersol, 1971).

Um exemplo típico de uma correlação cruzada entre os sinais de espessura de filme líquido capturados pelas duas sondas é ilustrado na Figura 7.2. Pode-se observar na figura a ocorrência de um pico de correlação bem definido, cuja posição na abscissa que representa o tempo, determina o atraso entre os sinais. É importante ressaltar que o tempo nos experimentos realizados é medido em número de quadros capturados pela câmera digital. Assim, para uma dada frequência de captura, *f*, o tempo de trânsito é obtido por,

$$t = \frac{n^q}{f} \tag{7.3}$$

onde, n^q representa o atraso entre os sinais dado em número quadros da imagem.

A resolução temporal na medição do atraso dos sinais através do máximo da função de correlação cruzada é dada, como mencionado, em quadros capturados. Nos experimentos realizados com o escoamento anular gás-líquido, os atrasos típicos verificados eram da ordem de alguns poucos quadros. Assim, uma incerteza de um quadro na medição do atraso produziria um nível de inaceitável determinação tempos incerteza na dos das ondas e, consequentemente, na determinação da velocidade de propagação destas ondas.

Para contornar este problema foi desenvolvida uma metodologia de cálculo que produz resoluções temporais menores que um quadro. Para isso, a função de correlação cruzada discreta entre os sinais era ajustada por uma curva Gaussiana. O ponto de máximo desta curva contínua podia então ser determinado com resolução sub-quadro. A linha contínua apresentada na Figura 7.2 representa o ajuste Gaussiano realizado pelos pontos da função correlação cruzada discreta obtida para aquele caso.

Os dados da Figura 7.2 podem ser usados para exemplificar o cálculo da velocidade de propagação das ondas do filme de líquido. No caso da figura, o valor máximo da função de correlação cruzada foi determinado como sendo igual a 4,7 quadros. Para a frequência de aquisição de imagens de 3000 Hz com o qual o experimento foi conduzido, este valor representa um tempo de trânsito, *t*, igual 1,57 ms. A velocidade de propagação das ondas é então obtida pela divisão da distância entre as sondas de 8,22 mm por este tempo de trânsito, resultando em 5,24 m/s.

A função de correlação cruzada foi calculada no presente trabalho utilizando-se a biblioteca do programa MATLAB[®].



Figura 7.2 - Função de correlação cruzada da espessura de filme medida na posição das sondas 1 e 2 para U_{sg} = 34 m/s e U_{sl} =0.112 m/s. A linha contínua passando pelos pontos representa um ajuste por uma função Gaussiana.

7.4. Espectro de Frequência do Sinal de Espessura do Filme de Líquido

As informações sobre o conteúdo espectral do sinal de espessura de filme de líquido foram obtidas pela determinação da densidade espectral de potência do sinal, *PSD* (Bendat & Piersol, 1971). Devido à limitação na memória das câmeras digitais empregadas e à natureza não periódica do sinal registrado, o resultado da *PSD* apresentou níveis de ruído que impossibilitariam a correta análise dos fenômenos físicos associados à dinâmica do escoamento. Para contornar este problema, foi utilizada uma técnica de janelamento do sinal original de espessura de filme. Esta técnica, conhecida como periodograma, consiste na subdivisão do sinal original em trechos sobre os quais são computados os espectros. Em seguida realiza-se uma média dos espectros calculados para cada janela, resultado em uma *PSD* significativamente mais suave.

O procedimento de janelamento é implementado pela multiplicação do sinal original por funções que assumem valor unitário no sub-intervalo de interesse e valor nulo fora deste intervalo. Existem diversas alternativas para a função de janelamento propostas na literatura (MATLAB, 2008 e Harris, 1978). No presente trabalho utilizou-se uma função de *Hamming* caracterizada por apresentar extremidades suaves, com derivadas de maior ordem contínuas, juntamente com uma sobreposição entre elas de 50%, o que resultou em uma melhor suavização da *PSD*.

A suavização obtida com a utilização da técnica de periodograma produz resultados equivalentes àqueles adquiridos a partir da média amostral de diversos espectros oriundos de experimentos independentes. Este fato pode ser verificado com o auxílio da Figura 7.3. Esta figura apresenta o espectro do sinal original, o espectro obtido com o periodograma, e aquele obtido a partir da média de 16 espectros de experimentos independentes. Pode-se observar o nível excessivo de ruído no espectro do sinal original e o efeito suavizador produzido pela média dos 16 espectros. Também pode-se notar que o espectro obtido com a técnica de periodograma apresenta efeito equivalente àquele resultante da média dos 16 espectros, apresentando-se portanto como uma alternativa mais econômica do ponto de vista do esforço experimental requerido.



Figura 7.3 - Comparação entre os espectros do sinal original com aqueles obtidos pelo periodograma com 16 janelas de *Hamming* e pela média de 16 espectros de experimentos independentes para U_{sg}=28 m/s e U_{sl}=0,112 m/s e seção de 15,8 mm.

Uma análise da Figura 7.3 mostra claramente que a metodologia de janelamento (periodograma) de fato aproxima de forma satisfatória a tendência esperada de suavização do espectro resultante, à medida que se aumenta o

número de ensaios independentes. Esta metodologia não causa grandes desvios em relação ao espectro real, e economiza de forma considerável o tempo gasto com a obtenção dos resultados. A densidade espectral de potência do sinal de espessura do filme de líquido de todos os experimentos longitudinais estudados no presente trabalho foi obtida empregando 128 janelas de *Hamming*.

7.5. Histograma da Espessura de Filme Líquido

Os dados de espessura de filme líquido medidos em função do tempo podem ser apresentados na forma de histogramas que indicam a probabilidade de ocorrência de diferentes faixas de espessura de filme de líquido. Um destes histogramas é mostrado na Figura 7.4, para o caso caracterizado por U_{sg} =20 m/s e U_{sf} =0.112 m/s.



Figura 7.4 - Histograma da espessura de filme líquido para $U_{sg}=20 \text{ m/s}$ e $U_{sr}=0.112 \text{ m/s}$ e D = 15,8 mm.

8 Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados para o escoamento anular horizontal ar-água, obtidos a partir das técnicas implementadas e descritas nos capítulos anteriores do presente trabalho. O objetivo desta apresentação é demonstrar a capacidade de medição da técnica desenvolvida e validá-la através da comparação com resultados disponíveis na literatura.

É importante ressaltar que no método desenvolvido, ao contrário da maioria das técnicas mais tradicionais que utilizam sondas elétricas, cada imagem utilizada para extrair as informações quantitativas do filme líquido, também está disponível para visualização. Esta característica torna esta técnica uma combinação simultânea de visualização qualitativa e quantitativa, o que fornece informações sobre a dinâmica do escoamento ainda não disponíveis na literatura.

Primeiramente, na Seção 8.1, serão apresentados os resultados extraídos a partir da visualização longitudinal do filme. Estes resultados incluem a espessura instantânea e média do filme de líquido, velocidade e espectro de ondas e histograma de espessuras de filme, obtidos para as duas seções de testes construídas com tubulações com diâmetros de 15,8 e 50,8 mm.

A Seção 8.2 apresenta os resultados extraídos a partir da visualização transversal do filme, onde é feita uma comparação com os resultados obtidos pela técnica de visualização longitudinal.

8.1. Medidas Longitudinais do Filme de Líquido

Uma série de experimentos foi realizada para validar as técnicas desenvolvidas no presente trabalho. Estes experimentos cobriram as vazões arágua descritas na Tabela 8.1 e na Tabela 8.2, respectivamente para os ensaios conduzidos nas seções de testes com 15,8 mm e 50,8 mm de diâmetro interno. De acordo com o mapa de padrões de escoamento de Taitel & Dukler (1976), todos os pares de vazão ar-água estudados encontram-se no regime de escoamento anular, o que pode ser verificado na Figura 8.1 e na Figura 8.2. Nas tabelas, U_{sg} , U_{sl} , \dot{m}_{sg} , \dot{m}_{sl} representam, respectivamente, as velocidades superficiais de gás e líquido, e as vazões mássicas de gás e líquido.



Figura 8.1 - Mapa de padrões de escoamento de Taitel & Dukler (1976), para seção de testes com diâmetro de 15,8 mm, com os pares de vazão ar-água no regime de escoamento anular estudados.



Figura 8.2 - Mapa de padrões de escoamento de Taitel & Dukler (1976), para seção de testes com diâmetro de 50,8 mm, com os pares de vazão ar-água no regime de escoamento anular estudados.

U _{sg} (m/s)	$\dot{m}_{\scriptscriptstyle sg}$ (kg/s)	U _{sl} (m/s)	<i>ṁ_{sl}</i> (kg/s)
20	0,0052	0,056	0,0110
24	0,0067	0,056	0,0110
28	0,0081	0,056	0,0110
34	0,0106	0,056	0,0110
20	0,0054	0,084	0,0165
24	0,0068	0,084	0,0165
28	0,0081	0,084	0,0165
34	0,0114	0,084	0,0165
20	0,0056	0,112	0,0220
24	0,0073	0,112	0,0220
28	0,0091	0,112	0,0220
34	0,0120	0,112	0,0220
20	0,0058	0,140	0,0274
24	0,0075	0,140	0,0274
28	0,0094	0,140	0,0274

Tabela 8.1 - Matriz de testes conduzidos na seção de 15,8 mm de diâmetro.

Tabela 8.2 - Matriz de testes conduzidos na seção de 50,8 mm de diâmetro.

U _{sg} (m/s)	$\dot{m}_{_{sg}}$ (kg/s)	U _{sl} (m/s)	$\dot{m}_{_{sl}}$ (kg/s)
30	0,0825	0,01	0,0203
35	0,1005	0,01	0,0203
40	0,1188	0,01	0,0203
25	0,0681	0,03	0,0608
30	0,0844	0,03	0,0608
35	0,1019	0,03	0,0608
25	0,0834	0,06	0,1216
30	0,0895	0,06	0,1216
35	0,1056	0,06	0,1216
25	0,0690	0,10	0,2027
30	0,0889	0,10	0,2027
35	0,1097	0,10	0,2027

8.1.1. Variação Temporal da Espessura de Filme Líquido

Nos testes realizados para visualização e medição longitudinal do filme líquido, 13100 imagens foram capturadas a uma frequência de aquisição de 250 Hz, o que corresponde a um tempo de aquisição de 52 segundos. As imagens adquiridas foram processadas digitalmente com os procedimentos descritos no Capítulo 5, fornecendo a variação temporal da espessura do filme de líquido na geratriz inferior do tubo.

Os gráficos da Figura 8.3 à Figura 8.6 apresentam resultados típicos da variação temporal da espessura do filme líquido inferior, obtidos para quatro ensaios distintos, cada um caracterizado por um par de vazões de líquido e gás. Nas figuras, a espessura do filme em milímetros é apresentada em função do tempo para um valor fixo da velocidade superficial de líquido e quatro diferentes valores da velocidade superficial de gás, todos obtidos na seção de testes com tubo de 15,8 mm. Para que a estrutura das ondas que caracteriza o filme de líquido possa ser melhor apreciada, as figuras apresentam apenas registros correspondendo a 1 segundo de escoamento.



Figura 8.3 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 20$ m/s e $U_{sl} = 0.056$ m/s, para a seção de 15,8 mm de diâmetro.



Figura 8.4 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 24$ m/s e $U_{sl} = 0.056$ m/s para a seção de 15,8 mm de diâmetro.



Figura 8.5 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 28$ m/s e $U_{sl} = 0.056$ m/s para a seção de 15,8 mm.



Figura 8.6 - Espessura de filme líquido para $U_{sg} = 34$ m/s e $U_{sl} = 0.056$ m/s para a seção de 15,8 mm.

Uma observação geral das figuras revela a estrutura do filme de líquido composta por grandes ondas, caracterizadas por grandes amplitudes e baixas frequências – as chamadas *disturbance waves* – e pequenas ondas apresentando pequenas amplitudes e elevadas frequências, normalmente denominadas na literatura como *ripples*.

Uma análise comparativa dos resultados apresentados nas figuras indica uma tendência de redução da espessura do filme de líquido com o aumento da velocidade superficial do gás, para cada valor fixo da velocidade superficial do líquido. Esta observação é um resultado clássico da literatura de escoamentos anulares, como observado, por exemplo, em Jayanti et al. (1990) e Paras & Karabelas (1991) que utilizaram sondas elétricas para a medição da espessura do filme de líquido.

8.1.2. Espessura Média do Filme de Líquido

Os gráficos da Figura 8.7 à Figura 8.10 apresentam os resultados obtidos que indicam a influência das velocidades superficiais de líquido e gás sobre a espessura média do filme de liquido nas geratrizes inferiores dos tubos das seções de 15,8 e 50,8 mm de diâmetro. A espessura média foi calculada como a média temporal dos registros de espessura instantânea de filme como aqueles apresentados na seção anterior. A espessura média do filme de líquido foi determinada utilizando-se a equação 7.1.

O cálculo de incertezas descrito no Apêndice B revelou que o nível de incerteza relativa na medição da espessura média de filme líquido é inferior a 1%.



Figura 8.7 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a seção de 15,8 mm em função da velocidade superficial do gás.



Figura 8.8 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a seção de 15,8 mm em função da velocidade superficial do líquido.



Figura 8.9 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a seção de 50,8 mm em função da velocidade superficial do gás.



Figura 8.10 - Comportamento da espessura média de filme de líquido para a seção de 50,8 mm em função da velocidade superficial do líquido.

A análise dos resultados apresentados na Figura 8.7 para o tubo de 15,8 mm indica que a espessura média do filme na parte inferior do tubo é uma função decrescente da velocidade superficial de gás, para uma dada velocidade superficial de líquido. Essa tendência está de acordo com resultados já disponíveis na literatura (Schubring & Shedd, 2009a, b, Jayanti et al., 1990 e Paras & Karabelas, 1991). Pode ser ainda observado na figura que a técnica de medição desenvolvida no presente trabalho foi capaz de capturar o comportamento da espessura média do filme que, para todas as velocidades superficiais de líquido estudadas, tem uma redução acentuada na sua taxa de decréscimo para velocidades superficiais do gás acima de valores em torno de 28 m/s. Schubring & Shedd (2009b) observaram esta tendência em seus experimentos com tubos do mesmo diâmetro, e a atribuíram à redistribuição do filme na circunferência do tubo. Estes autores utilizam esta região de insensibilidade da espessura média de filme à vazão de líquido como indicativo da transição entre os sub-padrões de escoamento ondulado-anular para totalmente-anular. Esse comportamento pode ser também associado à uma maior taxa de entranhamento do líquido no núcleo gasoso quando a velocidade superficial do gás é aumentada. A estabilização da espessura de filme para valores da velocidade superficial de gás acima de 28 m/s pode também ser observada na Figura 8.8, que apresenta os mesmo dados em função, agora, da

velocidade de líquido. Nota-se também na forma de apresentação dos dados empregada nesta figura, uma menor sensibilidade da espessura média de filme à velocidade superficial do líquido.

A Figura 8.9 e a Figura 8.10 apresentam os resultados para a espessura média do filme de líquido obtidos para o tubo de 50,8 mm de diâmetro. Também para este diâmetro da seção de testes, observa-se a dependência decrescente da espessura do filme com a velocidade superficial de gás. No entanto, para este diâmetro de tubo a limitação na potência do compressor de ar disponível não permitiu a realização de ensaios com velocidades superficiais de gás acima de 40 m/s, o que impossibilitou que o comportamento de diminuição da taxa de decréscimo da espessura média do filme fosse observado. Paras & Karabelas (1991), utilizando seção de testes também com diâmetro de 50,8 mm, observaram esta tendência da espessura do filme apenas para velocidades superficiais do gás superiores a 50 m/s, valor acima da capacidade de nossas instalações.

A Figura 8.11 e a Figura 8.12 foram preparadas para permitir uma comparação entre os valores medidos para a espessura média de filme inferior de líquido em seção de 50,8 mm de diâmetro obtidos por Paras & Karabelas (1991) e os resultados do presente trabalho. A Figura 8.11 e a Figura 8.12 apresentam a variação da espessura média do filme com a velocidade superficial do gás para velocidades superficiais do líquido iguais a 0,03 e 0,06 m/s, respectivamente. Apesar das faixas de velocidade de gás distintas, os resultados apresentados apontam para uma boa concordância para a menor velocidade superficial de líquido. Para a velocidade superficial de líquido de 0,06 m/s verifica-se uma maior diferença entre os valores medidos nos dois trabalhos. Porém, observa-se para maiores valores de velocidade superficial de gás uma tendência a uma melhor concordância. Seria desejável que outros estudos com faixas de velocidade superficial e diâmetro de tubo semelhante estivessem disponíveis na literatura para permitir determinar qual técnica apresenta resultados mais confiáveis.



Figura 8.11 - Comparação dos resultados da espessura média de filme líquido inferior entre o presente trabalho e os resultados de Paras & Karabelas (1991) para tudo com 50,8 mm diâmetro e U_{sl} =0,03 m/s.



Figura 8.12 - Comparação dos resultados da espessura média de filme líquido inferior entre o presente trabalho e os resultados de Paras & Karabelas (1991) para tudo com 50,8 mm diâmetro e U_{sl} =0,06 m/s.

Foi mencionado na Seção 4.1.6.5 que a memória disponível na câmera digital utilizada no registro das imagens utilizadas na extração da espessura do filme de líquido era limitada. Esta limitação poderia vir a introduzir dúvidas com relação à representatividade do valor médio calculado para a espessura de filme.

De fato, um registro por demais curto da variação temporal do filme pode fornecer uma representação distorcida do seu valor médio.

Para avaliar se o período de amostragem obtido com a câmera digital disponível era adequado para a avaliação do valor médio do filme, foram realizados testes auxiliares onde a resolução espacial da câmera digital foi reduzida de 512x512 *pixels* para 512x100 *pixels*. Esta redução permitiu que o período de amostragem das imagens fosse aumentado de 52 para 260 segundos, uma vez que a frequência de captura foi mantida fixa em 250 Hz.

Os valores de espessura média calculados para os dois períodos de amostragem utilizados diferiram de 0,4%, o que indicou que a amostragem de 52 segundos fornece uma boa representação do valor médio da espessura do filme.

A repetibilidade da técnica de medição do valor médio da espessura do filme de líquido foi avaliada pela repetição de 16 ensaios com os mesmos valores nominais das velocidades superficiais do líquido e do gás. O desvio padrão em relação à média encontrado entre as espessuras médias de filme dos 16 casos foi de 2%, o que atesta para a boa repetibilidade dos experimentos realizados.

8.1.3. Média Quadrática da Espessura de Filme Líquido – *RMS*

A média quadrática da espessura do filme de líquido – valor *RMS* – fornece medidas da intensidade das flutuações da espessura de filme que contribuem para a caracterização do escoamento. A Figura 8.13 apresenta a razão entre a espessura *RMS*, h_{RMS} , e a espessura média de filme em função da velocidade superficial de gás, para diferentes valores da velocidade superficial de líquido, obtidos para seção a seção de testes de 15,8 mm. Observa-se na figura que esta razão tem seu máximo em 67%, para as condições correspondentes à menor velocidade superficial de gás (20 m/s) e velocidade superficial de líquido de 0.084 m/s. Nota-se também na figura a forte tendência decrescente da razão h_{RMS}/h com o aumento da velocidade superficial do gás. Por outro lado, a Figura 8.14 mostra que esta razão é pouco sensível à velocidade superficial do líquido. Esses resultados estão de acordo com o trabalho de Paras & Karabelas (1991).



Figura 8.13 - Razão entre a espessura *RMS* e a espessura média de filme em função da velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm.



Figura 8.14 - Razão entre a espessura *RMS* e a espessura média de filme em função da velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm.

8.1.4. Velocidade de Propagação das Ondas de Líquido

Medidas de velocidade de propagação das ondas de líquido foram obtidas pela correlação cruzada dos dados de espessura do filme em função do tempo, medidos nas regiões das sondas 1 e 2, como descrito na Seção 7.3. Em todos os testes realizados, foi usada uma frequência de aquisição de imagens de 3000 Hz.

O cálculo de incertezas descrito no Apêndice B revelou que o nível de incerteza relativa no cálculo da velocidade de propagação das ondas é inferior a 4%.

Como já mencionado, a espessura de filme líquido em função do tempo e velocidade de onda foram obtidos através de experimentos separados empregando calibração espacial com magnificação óptica e frequência de aquisição diferentes. Para o cálculo da velocidade, verificou-se a necessidade de garantir uma distância axial entre as sondas grande o suficiente para que o número de quadros, correspondente ao atraso da melhor correlação entre os dois sinais, fosse grande o suficiente para não comprometer a incerteza no resultado. As distâncias entre as sondas de medição para cada configuração são apresentadas na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 – Distância entre as sondas de medição para cada configuração estudada.

Diâmetro (mm)	Montagem Óptica	Frequência (Hz)	Dist. Sondas (mm)
15,8	Longitudinal	3000	8,2
50,8	Longitudinal	3000	16,1

Deve-se ressaltar que a velocidade de onda obtida pelo método de medição utilizado representa a velocidade de propagação do grupo de ondas caracterizado pelo registro total de imagens capturado, ou seja, não há distinção entre as velocidades características de ondas por faixa de amplitude. Como será apresentado na Seção 8.1.7, medidas instantâneas da espessura do filme de líquido ao longo de toda a extensão de cada imagem (não somente nas regiões das sondas de medição) permitem a determinação de velocidades de propagação de cada onda.

Da Figura 8.15 à Figura 8.18 são apresentados os valores de velocidades de onda obtidos para todos os experimentos realizados, para as duas seções de testes, em função das velocidades superficiais do gás e do líquido. A tendência observada na literatura (Schubring & Shedd, 2008 e Paras & Karabelas, 1991) de aumento da velocidade de propagação das ondas tanto com a velocidade do líquido quanto com a do gás foi também verificada nos resultados obtidos com a técnica desenvolvida.

Para a seção de testes de 50,8 mm de diâmetro foi possível realizar uma comparação quantitativa dos valores obtidos para a velocidade de propagação

de ondas no presente trabalho com aqueles publicados por Paras & Karabelas (1991). Esta comparação é apresentada na Figura 8.19 e na Figura 8.20 para as velocidades superficiais de líquido de 0,03 e 0,06 m/s, respectivamente. A análise das figuras indica que as velocidades medidas no presente trabalho são superiores àquelas reportadas por Paras & Karabelas (1991). Até o presente momento não foi possível encontrar uma explicação que justificasse esta diferença.



Figura 8.15 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de gás para a seção de 15,8 mm.



Figura 8.16 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial do líquido para a seção de 15,8 mm.



Figura 8.17 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de gás para a seção de 50,8 mm.



Figura 8.18 - Variação da velocidade de onda com a velocidade superficial de líquido para a seção de 50,8 mm.



Figura 8.19 - Comparação entre os resultados da velocidade de onda do presente trabalho e Paras & Karabelas (1991) para a seção de 50,8 mm e U_{sl} =0,03 m/s.



Figura 8.20 - Comparação dos resultados da velocidade de onda do presente trabalho e Paras & Karabelas (1991) para a seção de 50,8 mm e U_{sl} =0,06 m/s.

8.1.5. Espectro de Frequência da Espessura do Filme de Líquido

A distribuição de frequências nos sinais de espessura de filme capturados foi obtida através da determinação da densidade do espectro de frequência – *PSD* – como descrito na Seção 7.4. Da Figura 8.21 à Figura 8.35 são apresentados estes resultados para todas as condições de vazão de líquido e gás estudadas nas duas seções de testes. Esses resultados demonstram a capacidade da técnica óptica implementada de extrair informações espectrais dos dados de espessura de filme.

A Figura 8.21 e a Figura 8.22 apresentam o espectro de frequências medidos na seção de 15,8 mm, para as velocidades superficiais do gás de 20 e 24 m/s, respectivamente. Em cada figura são apresentadas distribuições de frequências para quatro valores da velocidade superficial do líquido. Pode-se observar que, para esta faixa de vazões de gás, os picos de frequência dominante são poucos sensíveis a variações da vazão de líquido. Esta observação foi também obtida no trabalho de Schubring & Shedd (2008), que relacionou esta insensibilidade da frequência dominante ao escoamento do filme de líquido que, para esta faixa de vazão de gás, predominantemente escoa no filme base, sem alterar a frequência de passagem das ondas à medida que a vazão de liquido é aumentada. Estes autores atribuiram este comportamento ao sub-padrão de escoamento anular-ondulado.

Para as velocidades superficiais de gás mais elevadas, Figura 8.23 e Figura 8.24, observa-se uma tendência de aumento das frequências dominantes com o aumento da velocidade superficial do líquido, observação também em acordo com o trabalho de Schubring & Shedd (2008). Para estas condições de escoamento os autores atribuiram este comportamento à incapacidade do excesso de líquido em escoar no filme base, que passa a escoar na forma de ondas, que tornam-se mais frequentes.

A mudança no comportamento das frequências dominantes com a velocidade superficial de líquido comentada anteriormente para os teste com o tubo de 15,8 mm de diâmetro, pode ser melhor observada com o auxílio da Figura 8.36. Nesta figura, os picos de frequência dominantes extraídos da Figura 8.21 à Figura 8.24 são apresentados em função da velocidade superficial do líquido. Nota-se claramente a inversão da tendência das frequências dominantes mencionada, a partir de uma determinada velocidade superficial de gás.

A influência da velocidade superficial de gás na distribuição de frequências da espessura de filme líquido pode ser melhor observada da Figura 8.25 à Figura 8.28, onde os espectros de frequência são apresentados em função da velocidade superficial de gás, para todas as velocidades superficiais de líquido investigadas.

Os resultados para a distribuição de frequências do filme obtidos para o tubo com diâmetro de 50,8 mm são apresentados da Figura 8.29 à Figura 8.35. Observa-se nestas figuras uma dependência decrescente das frequências dominantes do espectro com o aumento da velocidade superficial de líquido, comportamento distinto daquele observado nos resultados para a seção de 15,8 mm de diâmetro. Isto pode ser melhor observado com o auxílio da Figura 8.37 e da Figura 8.38, onde os picos de frequência são apresentados em função da velocidade superficial do gás e líquido, respectivamente. Estes resultados se assemelham com aqueles apresentados por Jayanti et al. (1990) e Paras & Karabelas (1991) realizados em seções de teste com tubos de diâmetros de 30,2 e 50,8 mm de diâmetro, respectivamente.

Os resultados de espectro de frequência apresentados nesta seção para os dois diâmetros de tubulação mostram um aumento na frequência dominante da espessura de filme com o aumento da velocidade superficial de gás, para todas as velocidades superficiais de líquido investigadas. Este comportamento também foi observado por Jayanti et al. (1990), Paras & Karabelas (1991) e Schubring & Shedd (2008). Ainda, para as duas seções, observa-se um espalhamento horizontal das curvas de espectro de frequência com o aumento da velocidade superficial de gás. Este comportamento é uma consequência da redistribuição de energia das ondas por uma faixa de frequências mais ampla. Os espectros apresentam agora menores valores máximos de potência associados às frequências dominantes.



Figura 8.21 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=20 \text{ m/s}$ e D=15,8mm.



Figura 8.22 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para U_{sg} =24 m/s e D=15,8mm.



Figura 8.23 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=28 m/s$ e D=15,8mm.



Figura 8.24 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para U_{sg} =34 m/s e D=15,8mm.


Figura 8.25 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{s}=0,056$ m/s e D=15,8mm.



Figura 8.26 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{s}=0.084$ m/s e D=15,8mm.



Figura 8.27 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{s/=0,112}$ m/s e D=15,8mm.



Figura 8.28 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sr}=0,140 \text{ m/s}$ e D=15,8mm.



Figura 8.29 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para U_{sg} =25 m/s e D=50,8mm.



Figura 8.30 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para U_{sg} =30 m/s e D=50,8mm.



Figura 8.31 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para U_{sg} =35 m/s e D=50,8mm.



Figura 8.32 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{s}=0,01 \text{ m/s}$ e D=50,8mm.



Figura 8.33 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{s}=0,03 \text{ m/s}$ e D=50,8mm.



Figura 8.34 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{s}=0.06 \text{ m/s}$ e D=50,8mm.



Figura 8.35 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sr}=0,1 \text{ m/s}$ e D=50,8mm.



Figura 8.36 - Frequências dominantes para diferentes velocidades superficiais de gás para a seção de 15,8 mm.



Figura 8.37 - Frequências dominantes para diferentes velocidades superficiais de gás para a seção de 50,8 mm.



Figura 8.38 - Frequências dominantes para diferentes velocidades superficiais de líquido. para a seção de 50,8 mm.

8.1.6. Histograma de Espessura de Filme de Líquido

Informações relevantes sobre a distribuição de espessura do filme de líquido podem ser obtidas por histogramas que apresentam a probabilidade de ocorrência de diferentes valores da espessura do filme. Um destes histogramas é mostrado no tradicional formato de barras na Figura 8.39, para o caso caracterizado por U_{sg} =20 m/s e U_{sl} =0.112 m/s. Para permitir a comparação entre histogramas para diferentes pares de velocidades superficiais de gás e líquido em um mesmo gráfico, linhas contínuas foram ajustadas pelas barras dos histogramas, como pode ser visto na Figura 8.39.



Figura 8.39 - Histograma da espessura de filme líquido para U_{sg} =20 m/s e U_{sr} =0,112 para a seção de 15,8 mm.

Da Figura 8.40 à Figura 8.47 são apresentadas comparações entre os histogramas obtidos para a seção de testes de 15,8 mm. Nestas figuras pode-se observar a influência da velocidade superficial de líquido para quatro valores de velocidade superficial do gás. Uma análise conjunta das figuras indica uma tendência de aumento da probabilidade de ocorrência de ondas de espessuras cada vez menores, à medida que a velocidade superficial do gás é aumentada. Pode-se observar que para velocidades superficiais do gás acima de aproximadamente 28 m/s a maioria dos valores de espessura está agrupada na faixa de 0,5 mm, que é uma indicação do efeito de regularização que o gás impõe nas ondas do filme líquido. Nota-se também uma pequena influência da

velocidade superficial do líquido na forma da distribuição das espessuras representadas pelos histogramas.

Da Figura 8.48 à Figura 8.54 são apresentadas as comparações dos histogramas de espessuras para a seção de testes de 50,8 mm de diâmetro. Os resultados obtidos apresentam tendências semelhantes àquelas observadas para o tubo de menor diâmetro.



Figura 8.40 - Histograma da espessura do filme para U_{sg} =20 m/s e D=15,8 mm.



Figura 8.41 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=24 \text{ m/s}$ e D=15,8 mm.



Figura 8.42 - Histograma da espessura do filme para U_{sg} =28 m/s e D=15,8 mm.



Figura 8.43 - Histograma da espessura do filme para U_{sg} =34 m/s e D=15,8 mm.



Figura 8.44 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,056$ m/s e D=15,8 mm.



Figura 8.45 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,084$ m/s e D=15,8 mm.



Figura 8.46 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,112 \text{ m/s}$ e D=15,8 mm.



Figura 8.47 - Histograma da espessura do filme de para $U_{s}=0,140 \text{ m/s}$ e D=15,8 mm.



Figura 8.48 - Histograma da espessura do filme para U_{sg} =25 m/s e D=50,8 mm.



Figura 8.49 - Histograma da espessura do filme para U_{sg} =30 m/s e D=50,8 mm.



Figura 8.50 - Histograma da espessura do filme para U_{sg} =35 m/s e D=50,8 mm.



Figura 8.51 - Histograma da espessura do filme para $U_{s=0,01}$ m/s e D=50,8 mm.



Figura 8.52 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,03$ m/s e D=50,8 mm.



Figura 8.53 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,06$ m/s e D=50,8 mm.



Figura 8.54 - Histograma da espessura do filme para $U_{s}=0,1 \text{ m/s}$ e D=50,8 mm.

8.1.7. Evolução Espacial e Temporal das Ondas de Líquido

Os procedimentos desenvolvidos para a análise das imagens instantâneas capturadas do filme de líquido descritos no Capítulo 5, utilizaram informações limitadas destas imagens. De fato, apenas as regiões das imagens nas posições das duas sondas de medição foram utilizadas na determinação da variação temporal da espessura do filme de líquido.

A medição da espessura instantânea do filme de líquido ao longo de toda a extensão axial de cada imagem pode ser utilizada para produzir informações relevantes sobre a evolução temporal e espacial do filme. Para isso, a espessura do filme foi identificada em toda a largura da imagem, para todas as imagens registradas de um dado experimento. A captura das imagens nesse caso é feita sempre a elevadas taxas de aquisição, tipicamente 3000 Hz, para garantir uma boa resolução temporal do filme de líquido. Esta forma de análise do comportamento dinâmico do filme de líquido é um desenvolvimento original na literatura que proporciona resolução temporal e espacial da espessura do filme não alcançáveis por outras técnicas experimentais disponíveis. A título de comparação, pode-se mencionar o recente trabalho de Belt (2010) que utilizou a técnica de múltiplos sensores condutivos montados rente à parede interna do tubo e distribuídos axial e circunferencialmente. Os 320 sensores utilizados são interrogados utilizando a tecnologia empregada nas sondas do tipo wire-mesh (Prasser et al., 1998) e produzem informações instantâneas sobre a distribuição de espessura do filme de líquido. A resolução espacial obtida por estes autores foi de cerca de 17 mm na direção axial, comparada aos 0,050 mm de resolução obtidos com a técnica desenvolvida no presente trabalho.

Recentemente, Alekseenko (2008) apresentou uma nova técnica para a medição transiente do filme de líquido também baseada na fluorescência induzida por laser, que produz resoluções temporais e espaciais equivalentes às do presente trabalho. No entanto, esta técnica não fornece as imagens instantâneas do escoamento, sendo baseada na relação entre intensidade de fluorescência e espessura do filme obtida por procedimento prévio de calibração.

Da Figura 8.55 à Figura 8.58 são apresentados quatro mapas de evolução espaço-temporal da espessura de filme de líquido obtidos pela técnica desenvolvida para as seções de 15,8 e 50,8 mm. Para cada diâmetro, são apresentados dois mapas que ilustram a passagem das ondas de grande e pequena amplitudes. Cada mapa corresponde a um intervalo de 0,05 segundos de escoamento.

Os mapas apresentados nas figuras permitem observar com riqueza de detalhes a evolução das ondas no espaço e no tempo. Pode-se, por exemplo, identificar a presença de ondas de pequena amplitude superpondo-se às grandes ondas, assim como a coalescência de ondas de pequena amplitude formando ondas de maior amplitude, como indicado pelas setas na Figura 8.56.

Os mapas de espaço e tempo permitem também que a velocidade de propagação de ondas individuais seja obtida, ao contrário da velocidade do grupo fornecida pela técnica da correlação cruzada apresentada na Seção 7.3. A velocidade de ondas individuais pode ser determinada pela inclinação no plano x - t das linhas de máximo local de espessura.

Deve-se mencionar que os mapas espaço-temporais apresentados foram desenvolvidos ao final do presente trabalho. Assim, não foi possível, dentro do tempo disponível para a conclusão desta dissertação, realizar uma análise detalhada destes mapas que, certamente, produziriam informações relevantes sobre a estrutura dinâmica do filme de líquido. Estes exemplos de mapas foram introduzidos no texto para demonstrar a capacidade de medição da técnica desenvolvida. Fica aqui uma sugestão para a continuação do presente trabalho analisando detalhadamente os mapas espaço-temporais para as diversas configurações do escoamento investigadas.



Figura 8.55 - Diagrama espaço-tempo para $U_{s}=0,140 \text{ m/s}$ e $U_{sg}=20 \text{ m/s}$ para a seção com 15,8 mm de diâmetro interno.



Figura 8.56 - Diagrama espaço-tempo para $U_{si}=0,140 \text{ m/s}$ e $U_{sg}=20 \text{ m/s}$ para a seção com 15,8 mm de diâmetro interno



Figura 8.57 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,1$ m/s e $U_{sg}=30$ m/s para a seção com 50,8 mm de diâmetro interno.



Figura 8.58 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sl}=0,1$ m/s e $U_{sg}=30$ m/s para a seção com 50,8 mm de diâmetro interno

8.2. Medidas Transversais do Filme de Líquido

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos com a técnica de medição baseada na visualização transversal do filme de líquido descrita no Capítulo 6.

A Figura 8.59 apresenta uma sequência de imagens da seção transversal do escoamento do filme de líquido. Nestas imagens foi capturada a passagem de uma grande onda formada nas condições de velocidades superficiais de ar e água de, respectivamente, 20 m/s e 0,140 m/s.



Figura 8.59 - Sequência de magens da seção transversal do escoamento do filme de líquido durante a passagem de uma grande onda para U_{sg} =20 m/s e U_{sr} = 0,140 m/s.

Uma análise qualitativa visual em câmera lenta de uma sequência de imagens como a apresentada na figura permite observar claramente movimentos circumferenciais do filme líquido ao longo das paredes do tubo. Estes movimentos alternam intervalos de escoamento ascendente e descendente, como resultado da passagem de uma grande onda. Estas observações podem auxiliar no entendimento dos mecanismos responsáveis pela sustentação do filme superior de líquido.

A Figura 8.60 (a) e (b) apresenta dois conjuntos de três imagens de filme de líquido obtidas para a mesma velocidade superficial de líquido e para dois valores da velocidade superficial de gás. As imagens permitem avaliar, ainda que de forma sutil na versão impressa, que o filme de líquido se distribui circunferencialmente de modo mais uniforme com o aumento da velocidade o gás, como já comentado anteriormente.



Figura 8.60 - Imagens da distribuição de filme de líquido ao longo da seção transversal (a) $U_{sa}=20$ m/s e $U_{sr}=0,112$ (b) $U_{sa}=34$ m/s e $U_{sr}=0,112$.

8.2.1. Medição da Espessura de Filme Líquido

A medição instantânea da distribuição circunferencial da espessura do filme de líquido em uma seção transversal pode ser realizada a partir de imagens instantâneas como aquelas apresentadas na Figura 8.59. Para isso, foram utilizadas as técnicas de processamento de imagens apresentadas no Capítulo 6. A Figura 8.61 (a) e (b) apresenta resultados da medição da espessura instantânea de filme ao longo da circunferência do tubo.



Figura 8.61 – Medição da espessura instantânea de filme ao longo da circunferência do tubo (a) a cada 5° e (b) a cada 1° e ajustadas por uma curva.

Na Figura 8.61(a) as medições foram realizadas a cada 5º enquanto na Figura 8.61(b) as medições foram feitas a cada 1º e ajustadas por uma curva que descreve com clareza a distribuição instantânea do filme de líquido. Resultados como os apresentados nestas figuras ainda não foram publicados na literatura, constituindo-se em uma contribuição original do presente trabalho.

Uma observação cuidadosa das imagens apresentadas na Figura 8.61, mostra que há regiões mal iluminadas que dificultam a medição da espessura do filme em algumas posições circunferenciais. Isto se deve, como já comentado no Capítulo 6, à má distribuição da iluminação proveniente do plano de laser que, nos experimentos conduzidos, incidia por apenas um dos lados da caixa de visualização. Esta limitação está sendo corrigida pela divisão do feixe laser produzindo iluminação simultânea em dois ou mais planos. No momento da preparação do texto desta dissertação, os componentes ópticos necessários para a implementação deste novo arranjo de iluminação ainda não estavam disponíveis, o que impossibilitou a condução de experimentos utilizando a técnica de visualização transversal com uma melhor iluminação.

8.2.2. Comparação entre Medidas na Imagem Longitudinal e Transversal

Apesar das limitações na iluminação mencionadas na seção anterior, foram realizados testes comparativos entre as técnicas de medição utilizando os planos de iluminação longitudinal e transversal. Para isso, a seção transversal do tubo foi iluminada de baixo para cima, garantindo assim uma boa iluminação e definição óptica da interface do filme na geratriz inferior do tubo, posição onde a técnica longitudinal havia sido implementada.

A Figura 8.62 apresenta o resultado para o espectro de potência do sinal de espessura de filme obtido pelas técnicas longitudinal e transversal de medição na geratriz inferior do tubo, para U_{sg} =20 m/s e U_{si} =0,140 m/s. Pode-se verificar que a concordância obtida é excelente. Para as condições de escoamento da Figura 8.62, as espessuras médias de filme obtidas pelas técnicas longitudinal e transversal foram, respectivamente, 0,88 e 0,87 mm, o que é mais uma demonstração do nível de concordância obtido pelas duas técnicas.



Figura 8.62 - Comparação do espectro de frequências do sinal de espessura de filme de líquido na geratriz inferior do tubo, obtido pelas técnicas longitudinal e transversal, para U_{sg} =20 m/s e U_{sl} =0,140 m/s.

9 Conclusão

No presente trabalho foi desenvolvida e testada uma técnica óptica para a medição das propriedades estatísticas e espectrais da espessura do filme de líquido em escoamento anular horizontal ar-água.

A técnica proposta baseia-se na visualização do escoamento, seguida da determinação automática da variação temporal da espessura do filme de líquido. Para isso, o escoamento foi iluminado por um plano de luz laser de elevada energia e frequência de pulsação. A técnica de Fluorescência Induzida por Plano de Laser (*PLIF*) foi utilizada para separar a luz emitida pelo filme de líquido daquela, muito mais intensa, refletida pela interface ar-água. Uma solução do corante rodamina em água foi utilizada como substância fluorescente.

Para possibilitar a visualização e medição das pequenas espessuras de filme junto à parede do tubo, características de escoamentos anulares, a seção de testes construída utilizou tubos fabricados em *FEP* (*Fluorinated Ethylene Polypropylene*). Este material apresenta índice de refração muito próximo ao da água, o que minimizou as distorções ópticas.

A captura das imagens do filme de líquido, iluminadas pelo plano laser, foi realizada utilizando-se câmeras digitais de altas taxas de aquisição e boa resolução espacial, operadas em sincronia com o disparo dos pulsos do laser. O laser e a câmera eram capazes de disparar e capturar imagens com frequências de até 3000 Hz, valor suficiente para registrar as informações transientes sobre o filme de líquido. Os sistemas de iluminação e captura de imagens utilizados produziram imagens de alta qualidade que auxiliam na interpretação da dinâmica do filme de líquido.

Duas versões da técnica de medição foram implementadas. Em uma delas, uma seção longitudinal do filme era iluminada por um plano pulsado de laser e observada por uma câmera digital operando em sincronia com o laser e montada ortogonalmente ao plano de iluminação. Esta versão da técnica fornecia imagens instantâneas da seção longitudinal do filme de líquido na geratriz inferior do tubo. Na segunda técnica implementada, utilizaram-se duas câmeras idênticas de alta taxa de aquisição de imagens posicionadas em um

arranjo estereoscópico, gerando imagens instantâneas da seção transversal completa do filme de líquido ao longo da circunferência do tubo.

Filmes apresentando o comportamento dinâmico do filme líquido no escoamento anular foram preparados no presente trabalho. Estes filmes foram capturados a taxas de aquisição de imagens da ordem de 2000 a 3000 Hz e, quando observados em câmera lenta, revelam aspectos do escoamento ainda não descritos na literatura internacional. Considera-se que estas visualizações sejam uma das mais importantes contribuições do presente trabalho. Recomeda-se ao leitor interessado acessar os vídeos em anexo à versão eletrônica da presente dissertação, disponível na biblioteca digital da PUC-Rio.

Algoritmos de processamento de imagens foram especialmente desenvolvidos para melhorar o contraste das imagens capturadas e medir automaticamente a espessura do filme em posições axiais pré-definidas em cada quadro de imagem capturado. Procedimentos de calibração foram também desenvolvidos para transformar as medidas realizadas na imagem para dimensões no escoamento real.

No caso da montagem estereoscópica, foram especialmente desenvolvidos algoritmos computacionais para distorcer as imagens da seção de testes obtidas a partir de cada uma das câmeras montadas em lados opostos do tubo, por onde se dava o escoamento de interesse. Estas câmeras observavam a seção reta do tubo por um ângulo de 45°. Um alvo de calibração posicionado dentro do tubo guiou a geração de polinômios que distorciam as imagens obtidas com as câmeras em ângulo. Estes mesmos polinômios foram posteriormente aplicados às imagens do escoamento, produzindo imagens perfeitamente circulares da seção de testes contendo o filme de líquido.

No caso das medições longitudinais, a aplicação dos algoritmos de processamento das imagens fornecia como resultado registros da variação da espessura do filme em função do tempo para posições axiais previamente definidas. Estes registros foram processados para produzir informações relevantes para o estudo do escoamento anular, tais como, valor médio e valor *RMS* da espessura de filme, espectro de frequência dos sinais de espessura e histogramas das distribuições de espessura do filme. Os resultados medidos para a espessura de filme em duas posições axiais pré-determinadas foram correlacionados para determinar a velocidade de propagação das ondas de líquido. Também foram produzidos mapas espaço-tempo onde a topografia das ondas pode ser claramente observada, possibilitando estudos sobre a interação de ondas de diferentes amplitudes.

A técnica de medição desenvolvida foi testada por um programa de ensaios englobando diversas combinações das velocidades superficiais de líquido e gás, para dois diâmetros de tubo, 15,8 e 50,8 mm. Os resultados obtidos foram comparados com resultados da literatura medidos com outras técnicas experimentais. O nível de concordância obtido das principais tendências de variação das propriedades medidas, em relação aos parâmetros globais do escoamento, com trabalhos encontrados na literatura, foi considerado muito bom.

A técnica de medição estereoscópica desenvolvida não foi exaustivamente testada como a técnica longitudinal. Não uniformidades na iluminação da seção reta do tubo produziram algumas zonas de sombra nas imagens do filme de líquido. Estas não uniformidades dificultaram a detecção da posição da interface do filme em algumas posições angulares. Apesar disso, em posições onde a iluminação era considerada satisfatória, os resultados da técnica estereoscópica foram comparados com as medições da técnica longitudinal, apresentando excelente concordância. Um novo sistema óptico foi projetado para solucionar os problemas de não uniformidade de iluminação, mas não ficou disponível para ser testado antes da conclusão da presente dissertação.

Acredita-se que as técnicas desenvolvidas constituem-se em ferramentas úteis para o estudo de escoamento bifásico líquido-gás. Tratam-se de técnicas não intrusivas com boa resolução temporal e espacial, e que apresentam como principal característica o fato de disponibilizarem para análise visual cada imagem de onde foram extraídas as informações quantitativas. Esta característica pode ser bastante útil para auxiliar na compreensão da dinâmica do escoamento. A versão estereoscópica da técnica fornece informações ricas sobre a estrutura instantânea do filme de líquido na seção transversal do tubo que, aparentemente, ainda não estão disponíveis na literatura.

Como ponto negativo das técnicas desenvolvidas pode-se mencionar a necessidade de acesso óptico ao escoamento, o que limita sua aplicação. Também, a necessidade de lasers pulsados de elevada energia e frequência de pulso junto com câmeras de altas taxas de captura de imagens, eleva o custo da técnica, tomando-se como base os preços vigentes no mercado na época da preparação do presente manuscrito.

Deve-se mencionar que, apesar de utilizar técnicas conhecidas como *PLIF* e ajuste de índice de refração entre o fluido e a parede do tubo, a extensão da técnica implementada para sistemas de alta frequência e, principalmente, a versão esterescópica da técnica são, de acordo com a pesquisa bibliográfica conduzida, contribuições originais deste trabalho.

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da implementação da técnica que combina visualização qualitativa com informações quantitativas sobre escoamento bifásico líquido-gás. Existem diversas possibilidades de aperfeiçoamento e aumento da capacidade de medição da técnica proposta.

A melhoria na resolução espacial e temporal da técnica pode ser obtida pela simples incorporação de novas tecnologias de câmeras digitais e lasers pulsados que são disponibilizados constantemente com maior resolução espacial, maiores taxas de aquisição de imagens, maiores frequências e energia de pulso, a preços cada vez menores.

Além disso, há outras possibilidades que mereceriam estudo, como a utilização simultânea da técnica longitudinal com a estereoscópica, ou a implementação da técnica estereoscópica de duplo plano que, em princípio, forneceria imagens instantâneas da seção reta do filme de líquido em dois planos transversais deslocados axialmente. O processamento adequado destas imagens forneceria informações relevantes sobre o desenvolvimento axial do filme de líquido. AGILENT APPLICATION NOTE. Introduction to Time, Frequency and Modal Domains. Nº.1405-1.

AGILENT APPLICATION NOTE. Introduction to Time, Frequency and Modal Domains. Nº.1405-2.

ALEKSEENKO S.V., ANTIPIN V.A., CHERDANTSEV A.V., KHARLAMOV S.M. & MARKOVICH D.M. Investigation of waves interaction in annular gas-liquid flow using high-speed fluorescent visualization technique. Microgravity Sci. Technol., V.20, pp. 271-275, 2008.

ALEKSEENKO S.V., ANTIPIN V.A., CHERDANTSEV A.V., KHARLAMOV S.M. & MARKOVICH D.M. *Two-wave structure of liquid film and waves interrelation in annular gas-liquid flow with and without entrainment*. Physics of Fluids, Vol. 21, 061701-061704, 2009(a).

ALEKSEENKO S.V., CHERDANTSEV A.V., CHERDANTSEV M.V. & MARKOVICH D.M. Investigation of secondary waves dynamics in annular gas– liquid flow. Microgravity Science and Technology. Vol. 21, Suppl. 1, 221-226, 2009(b).

ALEKSEENKO S.V., CHERDANTSEV A.V., HEINZ O.M., KHARLAMOV S.M. & MARKOVICH D.M. *Properties of primary and secondary waves in annular gas-liquid flow*. 7th International Conference on Multiphase Flow ICMF 2010, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *Flow Measurement Performance Test Codes*. ASME PTC 19.5/2004.

ANICETO, P. H. Desenvolvimento de Técnica Baseada em Fluorescência para Medição de Escoamento Bifásico em Regime de Golfada. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BARBOSA J. R. *Turbulência em Sistemas Bifásicos Gás-Líquido*. III Escola de Turbulência, 2002.

BELT R.J. On the Liquid Film in Inclined Annular flow. PhD. thesis, Delft University of Technology, Delft University Press, 2007.

BELT R.J., VAN'T WESTENDE J.M.C., PRASSER H.M. & PORTELA L.M. *Time and spatially resolved measurements of interfacial waves in vertical annular flow.* International Journal of Multiphase Flow 36, 570–587, 2010.

BENDAT, J.S. & PIERSOL, A.G. *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. Wiley-Interscience, New York, 1971.

BROWN, R.C., ANDREUSSI, P. & ZANELLI, S. The use of wire probes for the measurement of liquid film thickness in annular gas–liquid flows. Can. J. Chem. Eng. 56, 754–757, 1978.

BUTTERWORTH, D. & PULLING, D.J. A Visual Study of Mechanisms in Horizontal Annular Air-Water Flow. Atomic Energy Research Establishment, M-2556, Berkshire, 1972.

CONEY, M.W.E. The theory and application of conductance probes for the measurement of liquid film thickness in two-phase flow. J. Phys. E: Sci. Instr. 6, 903–910, 1973

FISCHLER, M. A. & BOLLES, R. C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Communications of the ACM 24: 381–395, 1981.

FUKANO, T., OUSAKA A. MORIMOTO T. & SEKOGUCHI K. Air-Water Annular Two-phase Flow in a Horizontal Tube. Bulletin of JSME, vol. 26, nº210, 1983. FUKANO, T. & OUSAKA, A. Prediction of the Circunferential Distribution of Film Thickness in Horizontal and Near-Horizontal Gas-Liiquid Annular Flows. International Journal of Multiphase Flow. Vol. 15, 1989.

GERACI G., AZZOPARDI B.J. & VAN MAANEN H.R.E. Effect of Inclination on Circumferential Film Thickness Variation in Annular Gas/Liquid Flow. Chemical Engineering Science 62, 3032-3042, 2007.

HARRIS, F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform. Proceedings of the IEEE. Vol. 66, 1978.

HEWITT, G. F. & ROBERTS, D.N. Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flash photography. U.K.A.E.A. Rep. N^o. AERE-M2159, 1969.

HEWITT, G.F., JAYANTI, S. & HOPE, C.B. *Structure of thin Liquid films in Gas-Liquid Horizontal Flow*. International Journal of Multiphase Flow. Vol. 16, 1990.

HOLMAN J. P. *Experimental Methods for Engineers*. Fourth Edition. Mc Graw Hill, 1984.

JAYANTI, S., HEWITT, G.F. & WHITE, S.P. *Time-Dependent Behaviour of The Liquid Film in Horizontal Annular Flow*. International Journal of Multiphase Flow. Vol. 16, 1990.

KOPLIN C.R. Local Liquid Velocity Measurements in Horizontal, Annular Two-Phase Flow. PhD Thesis. University of Wisconsin-Madison. 2004.

LAURINAT, J.E., HANRATTY, T.J. & JEPSON, W.P. *Film thickness distribution for gasliquid annular flow in a horizontal pipe. Physicochem. Hydrodyn.*, 6, pp. 179-195, 1985.

LIN, T.F., JONES, O.C., LAHEY, R.T., BLOCK, R.C. & MURASE, M. Film thickness measurements and modelling in horizontal annular flows. Physicochem. Hydrodyn., 6, pp. 197- 206, 1985.

MATLAB FOR WINDOWS USER'S GUIDE. The Math Works Inc., 2008.

MANDHANE, J.M., GREGORY, G.A. & AZIZ, K.A. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. International Journal of Multiphase Flow 1, 537-553, 1974.

MOFFAT, R.J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis. ASME Journal of Fluids Engineering, vol. 204, pp.250-260, 1982.

OLIVEIRA G.H. & PORTELA L.M. *The Interfacial Shear-Stress as a Film Pumping Mechanism in Annular Pipe-Flow.* 7th International Conference on Multiphase Flow, 2010.

PARAS, S.V. & KARABELAS, A.J. *Properties of the liquid layer in horizontal annular flow*. International Journal of Multiphase Flow. Vol. 17, 1991.

PLETCHER, R. H. & MCMANUS, H. N. The fluid dynamics of 3dimensional liquid films with free surface shear: a finite difference approach. Proceedings of the 9th Midwestern Mechanics Conference, Madison, 1965.

PRASSER, H. M., BOETTGER, A. & ZSCHAU J. A new electrode-mesh tomograph for gas–liquid flows. Flow Measure. Instrum. 9, 111–119, 1998.

RAFFEL M., WILLERT C.E., WERELEY S.T. & KOMPENHANS J. Particle Image Velocimetry – A Practical Guide. Second Edition Springer Berlin Heidelberg, New York, 2007.

RODRÍGUEZ, D.J. & SHEDD, T.A. Cross-sectional imaging of the film in *horizontal two-phase annular flow*. ASME Heat Transfer/Fluids Engineering Summer Conference, Charlotte, North Carolina, USA, 2004.

RUSSEL, T. W. F. & LAMB, D. E. *Flow mechanism of two-phase annular flow.* The Canadian Journal of Chemical Engineering, pp. 237-245, 1965

SCHUBRING, D. & SHEDD, T.A. *Wave behavior in horizontal annular airwater flow.* International Journal of Multiphase Flow. Vol. 34, 2008. SCHUBRING D. & SHEDD T.A. *Critical friction factor modeling of horizontal annular base film thickness*. International Journal of Multiphase Flow. Vol. 35, 2009(a).

SCHUBRING D. & SHEDD T.A. *Two-phase wavy-annular flow in small tubes*. International Journal of Heat and Mass Transfer 52 1619–1622, 2009(b).

SHEDD, T.A. & NEWELL, T.A. Automated optical liquid film thickness measurement method. Review of Scientific Instruments. Vol. 69, 1998.

SUTHARSHAN, B., KAWAJI, M. & OUSAKA, A. *Measurement of Circumferential and Axial Liquid Film Velocities in Horizontal Annular Flow.* International Journal of Multiphase Flow. Vol. 21, 1995.

TAITEL, Y. & DUKLER, A.E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas–liquid flow. AIChE Journal. Vol. 22, 1976.

TAYLOR, N.S.H. & NEDDERMAN, R.M. *The coalescence of disturbance waves in annular two phase flow.* Chemical Engineering Science. Vol. 23, 1968.

TONG, L. S. & TANG, Y. S. *Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow.* 2. ed. Washington, 1997.

VASSALO, P. *Near wall structure in vertical air-water annular flows*. International Journal of Multiphase Flow. Vol. 25, 1999.

ZABARAS, G., DUKLER, A.E. & MOALEM-MARON, D. Vertical upward cocurrent gás-liquid annular flow. AIChE J. 32 (5), 829–843, 1986.

Apêndice

A Calibração e Correção do Rotâmetro para Medição da Vazão de Ar

O rotâmetro fabricado pela OMEL utilizado para medir a vazão de ar nos experimentos conduzidos na seção de 15,8 mm, foi calibrado utilizando-se uma placa de orifício padrão ASME com diâmetros do tubo e da garganta de, respectivamente, 67 e 23,7 mm.

A placa de orifício utilizada possuía tomada de pressão de D e ½ D de acordo com o padrão ASME (2004). O coeficiente de descarga foi obtido pelo processo iterativo sugerido pela norma ASME.

A Figura A.1 apresenta a curva de calibração obtida para o rotâmetro operando com ar a 25℃ e 1 atm. Observa-se que uma relação linear foi obtida entre a vazão indicada pela placa de orifício e a leitura do rotâmetro.



Figura A.1 - Curva de calibração do rotâmetro contra a placa de orifício.

Para as condições especificadas de calibração, a vazão lida no rotâmetro pode ser relacionada com a vazão real através da seguinte curva de calibração,

$$Q_{rot}^{\ cal} = 0,9226.Q_{real}^{\ cal}$$
(A.1)

onde, Q_{real}^{cal} é a vazão do gás medida no rotâmetro nas condições de calibração e Q_{rot}^{cal} é a vazão do gás real nas condições de calibração.

Como os experimentos foram conduzidos muitas vezes em condições de pressão e temperatura diferentes daquelas de calibração, tornou-se necessária à implementação de uma correção na leitura do rotâmetro. Esta correção baseiase nos princípios físicos que regem o funcionamento do rotâmetro, quais sejam o equilíbrio entre o peso do flutuador, o empuxo e a força de arrasto produzida pelo fluido em escoamento. Assim pode-se escrever uma equação para a correção da vazão lida no rotâmetro (e.g., Holman, 1984) nas condições de calibração para as condições reais de operação.

$$Q_{real}^{\ cal} = Q_{rot}^{\ op} \left(\frac{\rho_{rot}^{\ op}}{\rho_{real}^{\ cal}}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(A.2)

onde, ρ_{real}^{cal} é a massa específica do gás nas condições de calibração, ρ_{rot}^{op} é a massa específica do gás nas condições de operação e Q_{rot}^{op} é a vazão lida no rotâmetro nas condições de operação.

Logo, a equação de correção da leitura no rotâmetro, para a condição na qual ele foi calibrado, dada uma condição real de operação, é indicada abaixo.

$$Q_{rot}^{\ cal} = 0,9226. Q_{rot}^{\ op} \left(\frac{\rho_{rot}^{\ op}}{\rho_{real}^{\ cal}}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(A.3)

B Cálculo das Incertezas de Medição da Técnica Desenvolvida

O presente apêndice destina-se a apresentar a metodologia utilizada para estimativa dos níveis de incerteza associados à determinação da espessura de filme de líquido pela técnica de detecção da interface descrita nos Capítulos 5 e 6. Nesta avaliação, foi adotada a metodologia comumente utilizada para o estudo de propagação de incertezas, conforme descrito no trabalho de Moffat (1982), sendo brevemente descrita a seguir.

Considerando um resultado, R, de um experimento que dependa da medição de *N* grandezas independentes, x_i , cada uma delas com incerteza experimental, δx_i , apresentando mesma distribuição de probabilidade, a incerteza no resultado, δR , pode ser avaliada como,

$$\delta R = \left\{ \left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \cdot \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \cdot \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_N} \cdot \delta x_N \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}}$$
(B.1)

Onde as derivadas parciais representam a sensibilidade do resultado a cada variável medida.

B.1 Incerteza na Técnica de Medição da Espessura de Filme de Líquido

A espessura de filme líquido em milímetros é definida segundo a equação abaixo.

$$h = \frac{h^p}{c} \tag{B.2}$$

onde, h^{p} é espessura de filme medida em pixels em um determinado instante, e c é o fator de calibração dado em pixel/mm.

Segundo a equação B.1, a incerteza na medição da espessura do filme de líquido em milímetros pode ser estimada por,

$$\delta h^{2} = \left(\frac{\partial h}{\partial h^{p}} \cdot \delta h^{p}\right)^{2} + \left(\frac{\partial h}{\partial c} \cdot \delta c\right)^{2}$$
(B.3)

As derivadas parciais podem ser obtidas derivando-se a equação B.2. Logo,

$$\partial h^{2} = \left(\frac{1}{c} \cdot \partial h^{p}\right)^{2} + \left(\frac{h^{p}}{c^{2}} \cdot \partial c\right)^{2}$$
(B.4)

Logo, a incerteza relativa na medição da espessura de filme líquido em milímetros pode ser estimada por,

$$\left(\frac{\partial h}{h}\right)^2 = \left(\frac{\partial h^p}{h^p}\right)^2 + \left(\frac{\partial c}{c}\right)^2 \tag{B.5}$$

A espessura de filme em pixels capturada em um determinado instante, h^{p} , é dada pela equação abaixo.

$$h^p = y_i^p - y_w^p \tag{B.6}$$

onde, y_i^p é a posição da interface em pixels detectada automaticamente pela rotina de processamento de imagens em um determinado instante, e y_w^p é a posição da parede interna do tubo em pixels, determinada manualmente pelo usuário utilizando o programa de processamento de imagens.

Utilizando-se a equação B.1, a incerteza relativa na medição da espessura de filme líquido em pixels pode então ser calculada como,

$$\left(\frac{\delta h^p}{h^p}\right)^2 = \left(\frac{\delta y_i^p}{y_i^p - y_w^p}\right)^2 + \left(\frac{\delta y_w^p}{y_i^p - y_w^p}\right)^2 \tag{B.7}$$

O fator de calibração, c, é estimado pela equação a seguir.

$$c = \frac{Y_1^{\ p} - Y_2^{\ p}}{Y_1 - Y_2} \tag{B.8}$$

onde, Y_1^p e Y_2^p são as coordenadas em pixels de dois pontos formados pela interseção das linhas da malha do alvo de calibração e $Y_1 - Y_2$ é a medida da dimensão deste espaçamento em milímetros.

Utilizando-se a equação B.1, a incerteza relativa no fator de calibração pode ser escrita como indicado na equação abaixo.

$$\left(\frac{\delta c}{c}\right)^2 = \left(\frac{\delta Y_1^p}{Y_1^p - Y_2^p}\right)^2 + \left(\frac{\delta Y_2^p}{Y_1^p - Y_2^p}\right)^2 + \left(\frac{\delta Y_1}{Y_1 - Y_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta Y_2}{Y_1 - Y_2}\right)^2 \tag{B.9}$$

Finalmente, combinando as equações, a incerteza relativa na espessura de filme de líquido obtida pela técnica proposta pode ser estimada por:

$$\left(\frac{\partial h}{h}\right)^{2} = \left(\frac{\partial y_{i}^{p}}{y_{i}^{p} - y_{w}^{p}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial y_{w}^{p}}{y_{i}^{p} - y_{w}^{p}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Y_{1}^{p}}{Y_{1}^{p} - Y_{2}^{p}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Y_{2}^{p}}{Y_{1}^{p} - Y_{2}^{p}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Y_{1}}{Y_{1} - Y_{2}}\right)^{2} + \left(\frac{\partial Y_{2}}{Y_{1} - Y_{2}}\right)^{2$$

Os valores das incertezas em cada variável medida em pixels foram determinados baseados na observação dos experimentos e, no caso incerteza na medição das distâncias no alvo de calibração, nas informações sobre a resolução do processo de usinagem empregado. A Tabela B.1 apresenta os valores utilizados na estimativa na incerteza na medida da espessura instantânea de filme de líquido,

Tabela B.1 - Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza na medida da espessura instantânea de filme de líquido.

Variável	Incerteza
δy_w^p	±2 pixels
δy_i^p	±3 pixels
δY_1^p	±1 pixel
δY_2^p	±1 pixel
δY_1	±0,1 mm
δY_2	±0,1 mm

A incerteza relativa no fator de calibração foi estimada em aproximadamente 2%. Para a seção de 15,8 mm, considerando o fator de calibração de 50 *pixels*/mm, a incerteza experimental estimada do valor medido da espessura instantânea do filme de líquido de 0,4 mm foi de \pm 14%. Já para um valor de 2 mm de espessura instantânea de filme de líquido os procedimento de estima de incerteza experimental descritos apontam para um incerteza de \pm 4%. Para a seção de 50,8 mm, considerando o fator de calibração de 21,7 *pixels*/mm, a incerteza experimental estimada do valor medido da espessura instantânea do filme de líquido de 0,4 mm foi de \pm 1%.

B.2 Incerteza na Medição da Espessura de Filme Líquido Média

A espessura de filme líquido média é definida segundo a equação 7.1 descrita no Capítulo 7 e reproduzida abaixo.

$$\overline{h} = \frac{\sum h}{N}$$
(B.11)
onde, *h* é espessura de filme em pixels em um determinado instante, e *N* é o número de medidas utilizado no cálculo da média. Logo, a incerteza na medição da espessura de filme média é dada por:

$$\delta \overline{h}^{2} = \sum \left(\frac{\partial \overline{h}}{\partial h_{i}} \cdot \delta h_{i} \right)^{2} + \left(\frac{\partial \overline{h}}{\partial N} \cdot \delta N \right)^{2}$$
(B.11)

Como a incerteza no número de medidas é nula, a incerteza relativa no cálculo de espessura média do filme líquido é dada por,

$$\left(\frac{\delta \bar{h}}{\bar{h}}\right)^2 = \left(\frac{1}{N.\bar{h}}\right)^2 \cdot \sum (\delta h)^2$$
(B.12)

A metodologia usada para estimar a incerteza na média da espessura de filme de líquido envolve a combinação da contribuição das incertezas da técnica de medição de cada valor instantâneo da espessura de filme, $\delta h_{técnica}$, com a flutuação do sinal de espessura do filme, δh_{flut} , característica do escoamento anular. Assim,

$$(\partial h)^2 = (\partial h_{flut})^2 + (\partial h_{técnica})^2$$
(B.13)

A estimativa na incerteza na medição da espessura instantânea de filme foi descrita na seção anterior. Uma estimativa para a incerteza da flutuação na espessura do filme de líquido pode ser obtida pelo desvio padrão, σ , calculado para uma série de medições de espessura realizadas ao longo de um período de tempo de condução do experimento.

A Tabela B.2 e Tabela B.3 apresentam os valores estimados para a incerteza no cálculo da média da espessura de filme de líquido para cada um dos casos estudados nas seções com diâmetro interno de 15,8 mm e 50,8 mm, respectivamente. Nota-se pela observação dos resultados apresentados nas tabelas que, apesar dos valores elevados da flutuação da espessura de tipicamente \pm 30%, os níveis de incerteza estimados para o valor médio da espessura de filme são bastante reduzidos, estando sempre abaixo de \pm 1%. Este baixo valor deve-se ao efeito do número elevado de medições utilizadas no cálculo do valor médio da espessura de filme de líquido.

U _{sg} (m/s)	U _{s/} (m/s)	δh _{med} /h _{med}
20	0,056	0,56%
20	0,084	0,59%
20	0,112	0,56%
20	0,140	0,49%
24	0,056	0,55%
24	0,084	0,55%
24	0,112	0,56%
24	0,140	0,47%
28	0,056	0,48%
28	0,084	0,49%
28	0,112	0,50%
28	0,140	0,45%
34	0,056	0,33%
34	0,084	0,35%
34	0,112	0,38%

Tabela B.2 - Incerteza relativa na medição de espessura média de filme líquido para

todos os casos estudados na seção de 15,8 mm.

Tabela B.3 - Incerteza relativa na medição de espessura média de filme líquido para

todos os casos estudados na seção de 50,8 mm.

U _{sg} (m/s)	U _{s/} (m/s)	$\delta h_{med}/h_{med}$
25	0,030	0,56%
25	0,060	0,54%
25	0,100	0,49%
30	0,010	0,58%
30	0,030	0,59%
30	0,060	0,59%
30	0,100	0,51%
35	0,010	0,58%
35	0,030	0,62%
35	0,060	0,63%
35	0,100	0,57%
40	0,010	0,63%

B.3 Incerteza no Cálculo da Velocidade de Onda

A velocidade de onda em m/s é definida segundo a equação abaixo.

$$v = \frac{d_s}{t} = \frac{L^p \cdot f}{c \cdot n^q} \tag{B.14}$$

onde, *c* é o fator de calibração da imagem dado em *pixel/*mm, L^p é a distância em pixels entre as duas sondas de medição, *f* é a frequência de aquisição das imagens e n^q é o número de quadros calculado pela correlação cruzada dos dois sinais de espessura de filme. Logo, de acordo com equação B.1, a incerteza no cálculo da velocidade de onda em m/s é estimada por,

$$(\delta v)^{2} = \left(\frac{\partial v}{\partial c} \cdot \delta c\right)^{2} + \left(\frac{\partial c}{\partial L^{p}} \cdot \delta L^{p}\right)^{2} + \left(\frac{\partial c}{\partial f} \cdot \delta f\right)^{2} + \left(\frac{\partial c}{\partial n^{q}} \cdot \delta n^{q}\right)^{2}$$
(B.15)

Considerando nulas as incertezas na determinação da frequência de aquisição de imagens, ∂f , e na determinação do espaçamento das sondas em pixels, ∂L^p , obtemos que a estimativa da incerteza relativa na velocidade de onda é dada por,

$$\left(\frac{\delta v}{v}\right)^2 = \left(\frac{\delta c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\delta n^q}{n^q}\right)^2 \tag{B.16}$$

O número de quadros calculado pela correlação cruzada é função da forma dos sinais de espessura de filme de líquido das sondas 1 e 2. Logo,

$$n^q = f\left(h^{s1}, h^{s2}\right) \tag{B.17}$$

Aplicando a equação B.1 na equação B.17, a incerteza relativa no cálculo do número de quadros pode ser dada por,

$$\left(\frac{\delta n^{q}}{n^{q}}\right)^{2} = \sum \left(\frac{\partial n^{q}}{\partial h_{i}^{s1}} \cdot \delta h_{i}^{s1}\right)^{2} + \sum \left(\frac{\partial n^{q}}{\partial h_{i}^{s2}} \cdot \delta h_{i}^{s2}\right)^{2}$$
(B.18)

Os coeficientes de sensibilidade do número de quadros, em relação a cada medida da espessura de filme líquida em um determinado instante para cada sonda que aparecem na equação acima, são estimados pelas derivadas parciais indicadas. Como não há uma função analítica que relacione a dependência do número de quadros com os sinais adquiridos em cada sonda, estas derivadas parciais foram estimada numericamente. Para esta estimativa das derivadas parciais foi utilizado um processo iterativo onde cada elemento, h_i , que compunha um registro completo da espessura do filme em cada sonda, tinha o seu valor alterado por um pequeno valor. O novo registro composto por todas as medidas originais e por este componente com valor alterado era fornecido como entrada ao algoritmo de correlação cruzada para determinação do número de quadros, n_{α} . A variação produzida em n_{α} como resultado da alteração no elemento h_i era armazenado e usado na estimativa do cálculo da derivada parcial. Este procedimento era repetido para todos os elementos que compunham um dado registro de valores de espessura de filme. Este método consiste em um processo iterativo onde a cada iteração i, a variável h_i é perturbada, h_i^* , e uma nova correlação cruzada é calculada, n^{q^*} . Então,

$$\frac{\partial n^q}{\partial h_i} = \frac{n^{q^*} - n^q}{h_i^* - h_i} \tag{B.19}$$

onde, h_i representa um valor medido para a espessura de filme em um dado tempo, h_i^* o valor da espessura de filme alterado por um pequeno fator, n^q é valor do número de quadros calculado pela correlação cruzada e n^{q^*} o novo valor calculado pela correlação cruzada quando o valor da espessura é alterado.

As Tabelas B.4 e B.5 apresentam os valores estimados para a incerteza no cálculo da velocidade de onda para cada um dos casos estudados nas seções com diâmetro interno de 15,8 mm e 50,8 mm, respectivamente. As tabelas indicam os valores obtidos pelo procedimento descrito para a incerteza relativa no número de quadros, assim como o valor final estimado para a incerteza na velocidade da onda. Nestes cálculos os valores para a incerteza na medição instantânea na espessura de filme foram estimados como descrito anteriormente na seção B.1.

U _{sg} (m/s)	U _{s/} (m/s)	δν/ν	δn ^q /n ^q
20	0,056	2,55%	1,56%
20	0,056	2,55%	1,56%
20	0,112	2,32%	1,13%
20	0,140	2,27%	1,03%
24	0,056	2,69%	1,78%
24	0,056	2,69%	1,78%
24	0,112	2,51%	1,48%
24	0,140	2,28%	1,05%
28	0,056	2,80%	1,94%
28	0,056	2,80%	1,94%
28	0,112	2,52%	1,51%
28	0,140	2,30%	1,08%
34	0,056	3,75%	3,16%
34	0,084	3,04%	2,27%
34	0,112	2,93%	2,11%

Tabela B.4 - Incerteza relativa no cálculo de espessura de filme líquido para todos os

U _{sg} (m/s)	U _{s/} (m/s)	δν/ν	δn ^q /n ^q
20	0,056	2,55%	1,56%
20	0,056	2,55%	1,56%
20	0,112	2,32%	1,13%
20	0,140	2,27%	1,03%
24	0,056	2,69%	1,78%
24	0,056	2,69%	1,78%
24	0,112	2,51%	1,48%
24	0,140	2,28%	1,05%
28	0,056	2,80%	1,94%
28	0,056	2,80%	1,94%
28	0,112	2,52%	1,51%
28	0,140	2,30%	1,08%
34	0,056	3,75%	3,16%
34	0,084	3,04%	2,27%
34	0,112	2,93%	2,11%

casos estudados na secão de 15.8 mm

Tabela B.5 - Incerteza relativa no cálculo de espessura de filme líquido para todos os

casos estudados na seção de 50,8 mm.

U _{sg} (m/s)	U _{s/} (m/s)	δν/ν	δn ^q /n ^q
25	0,030	1,60%	0,74%
25	0,060	1,52%	0,54%
25	0,100	1,49%	0,47%
30	0,010	1,49%	0,45%
30	0,030	1,49%	0,45%
30	0,060	2,16%	1,63%
30	0,100	1,54%	0,61%
35	0,010	1,64%	0,83%
35	0,030	1,57%	0,68%
35	0,060	1,50%	0,48%
35	0,100	1,53%	0,57%
40	0,010	1,67%	0,89%