



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 Pós-graduação 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

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

CDD: 621

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 transversais 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 transversal do tubo. Imagens obtidas 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 transversal 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 characterizing 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 – <i>PLIF</i>	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 – <i>PLIF</i>	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 de Dados Quantitativos	119
7.1. Espessura Média do Filme de Líquido	120

7.2. Média Quadrática da Espessura de Filme de Líquido – <i>RMS</i>	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 – <i>RMS</i>	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 – <i>PLIF</i> aplicada a escoamento bifásico anular horizontal.	44
Figura 3.3 - Diagrama do princípio de funcionamento do sistema de visualização empregando a técnica <i>PLIF</i> .	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 <i>FEP</i> .	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 <i>FEP</i> com água e (b) tubulação de vidro com água.	48

Figura 3.8 - Imagem típica capturada pela técnica de visualização longitudinal implementada.	50
Figura 3.9 - Vista esquemática frontal da montagem óptica utilizada para a visualização e medição longitudinal do filme de líquido.	51
Figura 3.10 - Imagem típica capturada pela técnica de visualização transversal implementada.	52
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 <i>PLIF</i> .	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 15,8 mm de diâmetro.	63
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 seção 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 visualização longitudinal e transversal.	72
Figura 5.1 - Configuração utilizada para a captura de imagens longitudinais	

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 b 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 $\alpha=4$ e $b=0,5$.	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 procedimento de processamento de imagens desenvolvido ($U_{sf}=0,112$ m/s e $U_{sg}=20$ 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 ($U_{sl}=0,112$ m/s e $U_{sg}=20$ 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 <i>Hamming</i> 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.	123
Figura 7.4 - Histograma da espessura de filme líquido para $U_{sg}=20$ m/s e $U_{sl}=0,112$ m/s 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 $U_{sg} = 20$ m/s e $U_{sl} = 0,056$ m/s, para a seção de 15,8 mm de diâmetro.	128
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.	128
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.	129
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.	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 $U_{sl}=0,03$ 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 <i>RMS</i> 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 <i>RMS</i> 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 $U_{sl}=0,03$ m/s.	140
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.	140
Figura 8.21 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de líquido para $U_{sg}=20$ m/s e $D=15,8$ 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 $U_{sg}=24$ m/s e $D=15,8$ 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 $D=15,8$ mm.	144
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 $D=15,8$ mm.	144
Figura 8.25 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,056$ m/s e $D=15,8$ mm.	145
Figura 8.26 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,084$ m/s e $D=15,8$ mm.	145
Figura 8.27 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,112$ m/s e $D=15,8$ mm.	146
Figura 8.28 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,140$ m/s e $D=15,8$ mm.	146
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 $D=50,8$ mm.	147
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 $D=50,8$ mm.	147
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 $D=50,8$ mm.	148
Figura 8.32 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,01$ m/s e $D=50,8$ mm.	148
Figura 8.33 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,03$ m/s e $D=50,8$ mm.	149
Figura 8.34 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,06$ m/s e $D=50,8$ mm.	149
Figura 8.35 - Densidade do espectro de frequência de espessura de filme em função do tempo, para diferentes velocidades superficiais de gás para $U_{sf}=0,1$ m/s e $D=50,8$ mm.	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 $U_{sg}=20$ 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 $U_{sf}=0,056$ m/s e $D=15,8$ mm.	154
Figura 8.45 - Histograma da espessura do filme para $U_{sf}=0,084$ m/s e $D=15,8$ mm.	155
Figura 8.46 - Histograma da espessura do filme para $U_{sf}=0,112$ m/s e $D=15,8$ mm.	155
Figura 8.47 - Histograma da espessura do filme de para $U_{sf}=0,140$ m/s e $D=15,8$ mm.	155
Figura 8.48 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=25$ m/s e $D=50,8$ mm.	156
Figura 8.49 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=30$ m/s e $D=50,8$ mm.	156
Figura 8.50 - Histograma da espessura do filme para $U_{sg}=35$ m/s e $D=50,8$ mm.	156
Figura 8.51- Histograma da espessura do filme para $U_{sf}=0,01$ m/s e $D=50,8$ mm.	157
Figura 8.52- Histograma da espessura do filme para $U_{sf}=0,03$ m/s e $D=50,8$ mm.	157
Figura 8.53- Histograma da espessura do filme para $U_{sf}=0,06$ m/s e $D=50,8$ mm.	157
Figura 8.54 - Histograma da espessura do filme para $U_{sf}=0,1$ m/s e $D=50,8$ mm.	158

Figura 8.55 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,140$ m/s e $U_{sg}=20$ m/s para a seção com 15,8 mm de diâmetro interno.	160
Figura 8.56 - Diagrama espaço-tempo para $U_{sf}=0,140$ m/s e $U_{sg}=20$ 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 $U_{sf}=0.140$ 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 5° e (b) a cada 1° 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 $U_{sf}=0.140$ 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 líquido 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_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*)

\bar{h} - Espessura média do filme de líquido (mm)

h_{RMS} - Valor 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

I_{min} - Intensidade mínima dos *pixels* da coluna

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

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

l_s - Largura das sondas de medição

Lim_{inf} - Valor mínimo de intensidade de cinza dos *pixels*

Lim_{sup} - 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 (m^3/h)

Q_{rot}^{cal} - Vazão de gás medida no rotâmetro nas condições de calibração (m^3/h)

Q_{rot}^{op} - Vazão lida no rotâmetro nas condições de operação (m^3/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^1 - 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_i^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_l - Massa específica do líquido (kg/m³)

ρ_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*