

MARLON MAURICIO HERNANDEZ CELY

**Tratamento e Análise de Dados Obtidos Através de Velocimetria por
Imagens de Partículas e Sensor de Impedância Elétrica de Malha de Fios
para Estudo de Escoamento Bifásico em Dutos de Geometria Anular**

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor.

Programa: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Térmica e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Oscar M. H. Rodriguez

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL
ENCONTRA-SE DISPONÍVEL
JUNTO AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA
EESC-USP.

São Carlos-SP

2018



Class. TESE ✓

Cutt. 10.103

31 100211440

Tombo T195/18

Sysno 2903899

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

H349t Hernández Cely, Marlon Mauricio
Tratamento e Análise de Dados Obtidos Através de Velocimetria por Imagens de Partículas e Sensor de Impedância Elétrica de Malha de Fios para Estudo de Escoamento Bifásico em Dutos de Geometria Anular / Marlon Mauricio Hernández Cely; orientador Oscar Mauricio Hernández Rodriguez. São Carlos, 2018.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em Térmica e Fluidos -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2018.

1. Escoamento bifásico. 2. Escoamento gás-líquido. 3. Padrão pistonado. 4. PIV. 5. Perfis de velocidade. 6. Sensor wire-mesh. 7. Duto anular.. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARLON MAURICIO HERNANDEZ CELY**.

Título da tese: "Tratamento e análise de dados obtidos através de velocimetria por imagens de partículas e sensor de impedância elétrica de malha de fios para estudo de escoamento bifásico em dutos de geometria anular".

Data da defesa: 21/02/2018.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Oscar Mauricio Hernandez Rodriguez**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Titular **Paulo Seleglim Junior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Nivaldo Aparecido Correa**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Erick de Moraes Franklin**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Prof. Dr. **Fernando Guimarães Aguiar**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovado

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

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

EESC/USP

Serviço de Pós-Graduação

Protocolado em 13 / 09 / 2018

JUL

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade de conhecer um novo país, cultura, amigos e de fazer realidade meus propósitos.

Ao Professor Oscar Mauricio Hernández Rodriguez pela sua grande ajuda, recomendações, apoio, assessorando e acreditando em meu trabalho de pesquisa de doutorado.

Ao Professor Oscar Saul Hernández Mendoza pelas suas recomendações e por acreditar no começo de meu doutorando.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, EESC, da Universidade de São Paulo, pelas proeminentes teorias oferecidas ao longo do curso. Especialmente aos professores do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos

Ao Victor Baptistella, um grande amigo, quem com sua colaboração, fez parte importante no desenvolvimento de minha pesquisa.

Ao Hugo Fernando Velazco Penã, colaboração no início da investigação com o sensor WMS.

Aos estudantes de iniciação científica Sergio Gomes e Ricardo Useche, pelo aporte a meu trabalho em seu início.

Aos técnicos José Bogñi, Hélio Trebi, Jorge Nicolau e Roberto Pratavieira, pela ajuda na realização dos trabalhos que fizeram possível a culminação de meu projeto.

Aos colegas do Núcleo de Engenharia Térmica e Fluidos, Marcel C Barbosa e Alex Almeida Colmanetti, meus agradecimentos pelo seu acompanhamento e discussões que enriqueceram o trabalho.

À STATOIL por sua colaboração financeira na pesquisa e apoiar meus conhecimentos.

À USP e EESC pela formação como doutor.

A minha Esposa Yaneth e filhos, David Santiago e Juan Jose por sua presença, paciência, compreensão, colaboração e amor, nesta etapa de minha vida. Aos meus pais, irmãs, sogros e família pelo apoio constante na minha formação como profissional.

Aos meus amigos do Brasil e da Colômbia por facilitar nossa estadia neste país irmão.

RESUMO

HERNANDEZ CELY, M. M. (2018). **Tratamento e Análise de Dados Obtidos Através de Velocimetria por Imagens de Partículas e Sensor de Impedância Elétrica de Malha de Fios para Estudo de Escoamento Bifásico em Dutos de Geometria Anular.** Texto redigido para o Exame de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A presença frequente de escoamentos bifásicos em diversos processos naturais e industriais tem motivado um grande interesse acadêmico nas últimas décadas. O caso particular do escoamento gás-líquido é geralmente encontrado na indústria do petróleo, onde pode apresentar-se em diferentes padrões de escoamento. Entretanto, há relativamente poucos dados disponíveis sobre escoamento gás-líquido em dutos de seção anular de grande porte. Para o estudo dos fenômenos físicos associados ao escoamento bifásico são necessários instrumentos de medição variados. Técnicas não intrusivas, como a velocimetria por imagem de partícula (PIV), permitem a aquisição de velocidades instantâneas nos escoamentos. Com base nas velocidades locais instantâneas, funções de densidade de probabilidade, velocidades médias, flutuações das velocidades e tensões de cisalhamento de Reynolds são calculadas. Outra técnica, intrusiva e de visualização tomográfica, é o sensor de impedância elétrica de malha de fios, que é capaz de produzir imagens do escoamento com alta resolução temporal e boa resolução espacial. Foi desenvolvida uma nova versão desse sensor, aqui denominado sensor *wire-mesh* anular (AWMS). Foi feita a sincronização do AWMS com o PIV e com uma câmera de alta velocidade para obtenção de informações detalhadas de escoamentos bifásicos em dutos de geometria anular. Foram obtidos e analisados dados de velocidade, tamanho e frequência de passagem das bolhas em escoamento pistonado, além de perfis de velocidade e características da turbulência em diferentes posições abaixo da bolha e no pistão. Tomografias das seções transversal e lateral do escoamento ar-água no padrão de escoamento pistonado foram tomadas e analisadas. A velocidade média da bolha foi calculada usando gravação de imagens em vídeo de alta velocidade, que foi comparada com os dados de velocidade obtidos por PIV.

Palavras-chave: Escoamento bifásico, Escoamento gás-líquido, Padrão pistonado, PIV, Perfis de velocidade, Sensor *wire-mesh*, Duto anular.

ABSTRACT

HERNANDEZ CELY, M. M. (2018). **Treatment and Analysis of Data Obtained through Particle Image Velocimetry and Wire-mesh sensor for the Study of Two-phase Flow in a Duct of Annular Geometry.** Text written for the PhD Examination – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

The frequent presence of two-phase flows in natural and industrial processes has motivated a great academic interest in recent decades. The particular case of oil-gas flow is usually found in the petroleum industry, where it can be observed in different flow patterns. However, there is a lack of data about gas-liquid flow in big ducts of annular geometry. In order to study the physical phenomena in two-phase flow several advanced measuring instruments are required. Non-intrusive techniques such as Particle Image Velocimetry (PIV) allow the determination of instantaneous velocity fields in flows. Based on instantaneous local velocities, probability density functions, mean velocities, velocity fluctuations and Reynolds shear stress are calculated. Another intrusive and tomographic visualization technique is the wire-mesh sensor, which is able to produce an image of the flow with high temporal resolution and good spatial resolution. A new version of it was developed in this work and it is called Annular Wire-Mesh Sensor (AWMS). The PIV, AWMS and a high speed video camera have been synchronized to obtain detailed two-phase flow information in ducts of annular geometry. Data of bubble velocity, length and frequency in slug flow, and also velocity profiles and turbulence characteristics at different position below the bubble and in the liquid slug, have been acquired and analyzed. Tomography of the cross-sectional and lateral sections of the two-phase air-water flow in the slug-flow pattern were taken and analyzed. The average velocity of the bubble was calculated using high-speed video recording, which was compared with the speed data obtained by PIV.

Keywords: Two-phase flow, Gas-liquid flow, slug flow, PIV, Velocity profiles, Wire-mesh sensor, Annular duct.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Padrões de escoamento para escoamento bifásico gás-líquido atualmente aceitos: (a) escoamento horizontal e levemente inclinado, (b) escoamento vertical ascendente, Extraída de Shoham (2006).....	31
Figura 2.2.	Padrões de Escoamento observados por Caetano et al. (1992).....	33
Figura 2.3.	Carta de fluxo de Baker (1954) G1: fluxo mássico de líquido, G2: fluxo mássico de gás).	35
Figura 2.4.	Esquemático do sistema de iluminação e de imagem para a geração da imagem de PIV, por Willert e Gharib (1991).	37
Figura 2.5.	Esquema de explicativo do processo <i>cross-correlation</i> , Willert e Gharib (1991).	38
Figura 2.6.	(a) Fotografia de um protótipo desenvolvido, (b) Representação esquemática do sensor wire-mesh, extraída. Velasco (2015).	42
Figura 2.7.	Circuito prático para a medição das impedâncias de um fluido. Tomado de, da Silva (2008).	42
Figura 2.8.	Resposta em frequência simplificada para o circuito de medição da admitância. Tomado de, da Silva (2008).	43
Figura 2.9.	Representação esquemática da célula unitária Zwanziger e Rosa (2006)	46
Figura 3.1.	Contextualização do PIV, (PALACIOS SÁNCHEZ F M, 2011).	48
Figura 3.2.	Esquema geral de funcionamento do sistema PIV, adaptada de http://www.seika-di.com	49
Figura 3.3.	Correlação espacial cruzada entre janela de interrogação da primeira imagem com a janela correspondente na segunda imagem. Imagem 1 instante t , Imagem 2 instante $t+\Delta t$. adaptada de (AZEVEDO, 2002), (ALMEIDA, 1997).	50
Figura 3.4.	Região base na posição de maior correlação (ALMEIDA, 1997).	50
Figura 3.5.	Avaliação das gravações PIV utilizando Auto correlação, adaptada de manual Flow Master, Lavisson.	51
Figura 3.6.	Avaliação das gravações PIV utilizando correlação cruzada, adaptada do manual Flow Master, Lavisson.	53
Figura 3.7.	Imagem original (esquerda) e imagem suavizada 9x9 (direita), adaptada do manual Flow Master, Lavisson.	54

Figura 3.8.	Geração do feixe de laser plano com espessura desprezível <i>Fonte: adaptada de</i> (MUÑOZ, 2008).	56
Figura 3.9.	Exemplo de uma célula de medição. Tomado de (DA SILVA, 2008).	59
Figura 3.10.	Diagrama esquemático do duto anular.....	63
Figura 3.11.	Componentes de velocidade em um escoamento turbulento em tubo: (a) componente axial x da velocidade; (b) componente radial r da velocidade; (c) componente azimutal θ da velocidade (POTTER, 2012).....	65
Figura 3.12.	Perfil de velocidade média e flutuações para tensões de Reynolds (PANTON, 2013).	66
Figura 3.13.	Distribuições de a tensão de cisalhamento em um escoamento desenvolvido (PANTON, 2013).....	67
Figura 3.14.	Perfil de velocidade adimensionais em função da posição adimensional. Adaptada de (SHAMES, 1973).....	69
Figura 4.1.	Vista esquemática da caixa de visualização na seção de teste no duto anular.	70
Figura 4.2.	Diagrama da instalação experimental, P&ID utilizada no presente estudo.	72
Figura 4.3.	Compressor de ar Schulz.....	73
Figura 4.4.	Inversores de Frequência.....	73
Figura 4.5.	Bomba helicoidal de alimentação de água, ao fundo, bomba helicoidal de alimentação de óleo.....	74
Figura 4.6.	Medidores de vazão de água. a) Altas vazões; b) Baixas vazões.....	75
Figura 4.7.	Medidores de vazão de ar. a) GAL50 Oval; b) SVTG3/8" Contech; c) SVTG1" Contech; b) SVTG2.1/2" Contech.	75
Figura 4.8.	Bancada experimental, geometria, dimensões, e distribuição de componentes, vista e perspectiva.	78
Figura 4.9.	Bancada experimental, geometria, dimensões, e distribuição de componentes, vista lateral.	78
Figura 4.10.	Caixa de visualização (esquerda) e gabarito (direita). Geometria.	79
Figura 4.11.	Estrutura de apoio para os movimentos câmera e laser.	80
Figura 4.12.	Posicionamento da câmera do PIV para obtenção das imagens.....	81
Figura 4.13.	Particle Image Velocimetry (PIV). Esquema do funcionamento do sistema PIV.	83
Figura 4.14.	Equipamentos ligados à AWMS no duto anular.	84

Figura 4.15.	Equipamentos da AWMS e do PIV no duto anular.	85
Figura 4.16.	a) Corte longitudinal da seção de instalação, com os flanges superior e inferior e o AWMS; b) Vista lateral da seção de instalação.....	86
Figura 4.17.	a) Corte transversal e detalhe do flange inferior com seus anéis e b) detalhe da posição do AWMS.....	86
Figura 4.18.	Corte transversal e detalhe do flange Superior com seus anéis.	87
Figura 4.19.	Representação esquemática do anular sensor (AWMS), com sua localização em um duto anular vista lateral.....	89
Figura 4.20.	Representação esquemática do anular sensor (AWMS), com sua localização em um duto anular, vista transversal.	89
Figura 5.1.	Perfis de velocidade adimensional das componentes para fluxo laminar $U_{média}$ para ($Re = 473$), com a velocidade na direção axial.....	91
Figura 5.2.	Perfil de velocidade adimensional na direção radial.	92
Figura 5.3.	Distribuição de velocidade axial adimensional para PIV ($U_{média}/u^*$) e Analítica, $U[.] = u/u^*$ para escoamento turbulento em um tubo horizontal.	93
Figura 5.4.	Flutuações da velocidade axial e radial média (rms), e tensões de Reynolds para escoamento turbulento em um tubo horizontal, para $Re = 41321$, em que a velocidade média calculada pela lei de potência é igual a $1,96\text{ m/s}$	95
Figura 5.5.	Escoamento em um duto anular.....	97
Figura 5.6.	Velocidade adimensional calculada experimentalmente PIV e analiticamente para escoamento laminar no duto anular.	98
Figura 5.7.	Velocidade axial média quadrática, U_{rms} , para escoamento laminar em um duto anular.	99
Figura 5.8.	Perfil de velocidade axial dado pelo PIV, $U_{média}$, para escoamento turbulento no duto anular.	100
Figura 5.9.	Raiz da velocidade média quadrática, U_{rms} para escoamentos turbulentos no duto anular.	101
Figura 5.10.	Raiz do valor quadrático médio para a velocidade radial, V_{rms} em escoamentos turbulentos no duto anular.	102
Figura 5.11.	Tensões de cisalhamento de Reynolds para escoamentos turbulentos no duto anular.	103
Figura 5.12.	Distribuições da tensão de cisalhamento de Reynolds e perfil de velocidade de escoamento turbulento em duto anular, próximo ao tubo interno e externo para $Re = 8587$, com 5 graus de inclinação em relação à horizontal.....	104

Figura 5.13	Distribuições da tensão de cisalhamento de Reynolds e perfil de velocidades de escoamento turbulento em duto anular, próximo ao tubo interno e externo para $Re = 7106$, com 2 graus de inclinação em relação à horizontal.	105
Figura 5.14	Perfis de velocidade adimensionais em função da posição radial adimensional U^+ , em escala logarítmica, para a camada limite em escoamento turbulento para parede do tubo interno com uma razão de raio $\alpha_r = 0.387$	107
Figura 5.15.	Perfis de velocidade adimensionais em função da posição radial adimensional U^+ , em escala logarítmica, para a camada limite em escoamento turbulento para a parede do tubo externo com uma razão de raio $\alpha_r = 0.0387$	107
Figura 5.16.	Bolha que atravessa a seção de visualização na parte superior e perfis de velocidade axial médios no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular em diferentes posições em relação ao nariz de bolha para $j_w = 0.154 [m/s]$ e $j_a = 0.039 [m/s]$	111
Figura 5.17.	Bolha que atravessa a seção de visualização na parte superior e perfis de velocidade axial média no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular em diferentes posições em relação ao nariz de bolha para $j_w=0,249 m/s$, $j_a=0,037 m/s$	112
Figura 5.18.	PDF de U_{mean} em várias posições L_b da bolha para $j_w=0,154 m/s$, $j_a=0,039 m/s$	115
Figura 5.19.	PDF de U_{mean} em várias posições L_b da bolha para $j_w=0,249 m/s$, $j_a=0,037 m/s$	116
Figura 5.20.	Perfil de velocidade axial médio em diferentes posições L_b da bolha para $j_w=0,154 m/s$, $j_a=0,039 m/s$	117
Figura 5.21.	Perfil de velocidade média axial em diferentes posições L_b da bolha para $j_w=0,249 m/s$, $j_a=0,037 m/s$	118
Figura 5.22.	Estatísticas de turbulência, U_{rms} , V_{rms} e tensão de cisalhamento de Reynolds para $j_w=0,154 m/s$, $j_a=0,039 m/s$	119
Figura 5.23.	Estatísticas de turbulência U_{rms} , V_{rms} e tensão de cisalhamento de Reynolds para $j_w=0,249 m/s$, $j_a=0,037 m/s$	120
Figura 5.24.	Gráfico comparando os 12 modelos implementados, para escoamento com $j_w = 0,092 m/s$ e $j_a = 0.055 m/s$. Ao lado direito, quatro modelos escolhidos.	122
Figura 5.25.	Fração de vazio média numa seção transversal em função do tempo; abaixo, histograma mostrando a distribuição de frações de vazio para $j_w = 0,092 m/s$ e $j_a = 0,55 m/s$	123
Figura 5.26.	Sincronismo PIV e AWMS, escoamento $Q_w = 148 L/min$ e $Q_a = 38 L/min$ - ($j_w=0,154 m/s$, $j_a=0,039 m/s$).	126
Figura 5.27.	Sincronismo PIV e AWMS, escoamento, $Q_w = 240 L/min$ e $Q_a = 32 L/min$ - ($j_w=0,249 m/s$, $j_a=0,033 m/s$).	127
Figura 5.28.	Distribuição Espectral de Potência, PSD.	128

Figura 5.29. Fração de vazio temporal e onda quadrada gerada.	130
Figura 5.30. Seção de visualização para a nova geometria de duto anular com diâmetro externo de 155 e interno de 125 mm.	133
Figura 5.31. Velocidade axial média, adimensional calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por meio do PIV e analiticamente para escoamento laminar no duto anular, com $Re=800$	134
Figura 5.32. Velocidade axial média calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por meio do PIV para escoamentos turbulentos.	137
Figura 5.33. Comparação de perfis médios de velocidade, Laminar e Turbulento.	138
Figura 5.34. Tensão de cisalhamento de Reynolds medida experimentalmente para escoamento turbulento.	140
Figura 5.35. Flutuações na direção axial para escoamentos turbulentos, U_{rms}	141
Figura 5.36. Flutuações na direção radial para escoamentos turbulentos, V_{rms}	142
Figura 5.37. Oscilação das velocidades médias axiais de cada frame.	146
Figura 5.38. Oscilação das velocidades médias radiais em cada frame.	146
Figura 5.39. Modelagem da tensão cisalhante no duto anular	147
Figura 5.40. Comparação solução analítica e experimental para as tensões de cisalhamento.	148
Figura 5.41. Perfis de velocidade adimensionais em função da posição adimensional U^+ , em escala logarítmica, para a lei da parede em escoamento turbulento, próximo ao tubo interno com razão de raio $\alpha_r = 0.8$	150
Figura 5.42. Perfis de velocidade adimensionais em função da posição adimensional U^+ , em escala logarítmica, para a lei da parede em escoamento turbulento, próximo ao tubo externo razão de raio $\alpha_r = 0.8$	150
Figura 5.43. Velocidade axial média calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por PIV para escoamento estratificado com altura na interface de 50 mm com um número de Reynolds de 1836.	152
Figura 5.44. Velocidade axial média calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por meio do PIV para escoamento estratificado com altura na interface H de 100 mm, e um número de Re de 3888.	152
Figura 5.45. Flutuações axiais e radiais para escoamento estratificado com altura da interface de 50 mm e 100 mm.	153
Figura 5.46. Tensão de cisalhamento de Reynolds para escoamento estratificado, $H = 50$ mm.	155
Figura 5.47. Tensão de cisalhamento de Reynolds para escoamento estratificado, $H = 100$ mm.	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Modelos de relação entre a fração da fase dispersa e a permissividade de uma mistura bifásica tomada de (VELASCO, 2015).	61
Tabela 4.1. Faixas de medição dos medidores de vazão de água e ar.	76
Tabela 5.1. Erros no escoamento laminar e turbulento no tubo e no duto anular.	98
Tabela 5.2. Análise da velocidade média, com relação à velocidade mínima mensurável perto da parede, próximo ao tubo interno.	109
Tabela 5.3. Análise da velocidade média, com relação à velocidade mínima mensurável perto da parede próximo ao tubo externo.	109
Tabela 5.4. Comparação de resultados para velocidades de passagem das bolhas.	131
Tabela 5.5. Principais características dos escoamentos bifásicos estratificados e monofásicos laminares.	136
Tabela 5.6. Principais características dos escoamentos turbulentos.	139
Tabela 5.7. Flutuações radiais (V_{rms}) e axiais (U_{rms}) para escoamentos turbulentos.	144
Tabela 5.8. Principais características dos escoamentos bifásicos estratificados nova geometria.	151
Tabela 5.9. Principais características para escoamento estratificado, valores das velocidades de flutuação axial e radial.	157

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

Símbolo	Descrição
A	área da seção transversal do tubo
A_0	área da seção transversal do tubo ocupada pela fase óleo
A_w	área da seção transversal do tubo ocupada pela fase água
A_g	área da seção transversal ocupada pelo gás (ar)
A_p	área das placas
C_a	fração volumétrica de injeção da fase ar
C_0	fração volumétrica de injeção da fase óleo (adm.)
C_w	fração volumétrica de injeção da fase água (adm.)
C	capacitância
d	comprimento
L	comprimento do tubo
f	frequência radial
G	condutância
I	corrente elétrica complexa
j	velocidade superficial
j_w	velocidade superficial água
j_a	velocidade superficial ar
k_g	fator relacionado à geometria de um capacitor
N_i	número de amostras
N_f	número de frames
$N_{quadros}$	número de quadros
Q	vazão volumétrica de injeção
Q_a	vazão volumétrica de injeção da fase ar
Q_w	vazão volumétrica de injeção da fase água
R	resistência
R_M	raio do ponto máximo da velocidade
t	tempo
s	escorregamento
u_i	velocidade axial instantânea
v_i	velocidade radial instantânea
u_τ	velocidade de atrito
u^*	velocidade de atrito por Blasius
U	velocidade média no tempo na direção x
U_{mean}	velocidade média axial
V_{mean}	velocidade média radial
U_{rms}	flutuação axial da velocidade
U^*	média do perfil de velocidade de cada quadro
V_{rms}	flutuação radial da velocidade

V_o	velocidade <i>in situ</i> da fase óleo
V_w	velocidade <i>in situ</i> da fase água
v_{ma}	velocidade média do escoamento no duto anular
v_m	velocidade média do escoamento em tubo horizontal.
V	amplitude da Voltagem / Volume; velocidade média do tempo na direção
V_{HSVC}	velocidade de passagem somente com a câmera de alta velocidade
V_{WMS}	velocidade média baseado nos dados da AWMS
W	velocidade média do tempo na direção φ
Y	admitância complexa
x	posição
Z	impedância complexa

Letras gregas

Símbolo	Descrição
ε_o	fração volumétrica da fase óleo, permissividade do vácuo
ε_w	fração volumétrica da fase água
ε_s	permissividade relativa para baixas frequências
ε_∞	valor da permissividade para frequências óticas
ε_{rp}	valor da permissividade para frequências óticas
α	fração de uma fase
α_{WMS}	fração de vazio média
ε	permissividade relativa estática
γ	relativo a raios-gama
μ	constante associada a calibração
μ	viscosidade dinâmica
σ	condutividade estática
θ	fase de um sinal elétrico
ν	constante associada a calibração
ν	é a viscosidade cinemática
ω	frequência angular
τ	tensão de cisalhamento
\mathcal{E}	valor máximo do $\overline{u'v'}$ no ponto máximo da velocidade

Subscritos

Símbolo	Descrição
c	referente a fase contínua
d	referente a fase dispersa
e	equivalente de uma mistura de fluidos

<i>f</i>	referente ao laço de realimentação de um circuito elétrico
<i>g</i>	referente ao gás
<i>H</i>	referente a uma substância de permissividade alta
<i>i</i>	referente a uma posição / voltagem de entrada
<i>j</i>	referente a uma posição
<i>k</i>	referente a um tempo discreto
<i>l</i>	referente a uma fase líquida
<i>L</i>	referente a uma substância de permissividade baixa
<i>log</i>	referente a uma voltagem logarítmica
<i>o</i>	referente ao óleo / referente a uma voltagem de saída
<i>m</i>	referente a uma mistura de fluidos
<i>w</i>	referente à água

LISTA DE SIGLAS

ADC	conversor análogo digital (<i>analog digital converter</i>)
AWMS	sensor anular wire mesh
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor – Sensor eletrônico que converte a luz (fótons) em cargas elétricas (elétrons).
CLD	distribuição do comprimento da corda
CCD	Charged-Coupled Device – Dispositivo eletrônico que converte a Intensidade da luz em valores digitais armazenáveis
DDPIV	Desfocalização Digital em Velocimetria por Imagem de Partículas
DSC	distribuição do tamanho do cristal
DSD	distribuição de tamanho de gota
FBRM	medição de reflectância do feixe focado
FFT	transformada rápida de Fourier
HSWG	alta granulação úmida de cisalhamento
ID	diâmetro interno
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LDA	Anemometria laser doppler
LPF	filtro passa baixas (<i>low pass filter</i>)
NETeF	Núcleo de engenharia térmica e fluidos
Nd:YAG	Neodímio-dopado Ítrio Alumínio Garneto
ORM	medição por reflectância ótica
PSD	Distribuição Espectral de Potência
PIV	velocimetria por imagem de partícula
PVM	medição por visão de partícula

P&ID	plano de instrumentação e controle
SPIV	Velocimetria por Imagem de Partícula Estereoscópica
TTL	logica a transistor transistor
WMS	sensor <i>wire-mesh</i> (<i>wire-mesh sensor</i>)
3D	terceira dimensão.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	26
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1. Terminologia básica do escoamento bifásico gás-líquido	28
2.2. Escoamentos gás-líquido	30
2.3. Escoamentos em dutos anulares	32
2.4. Mapas de fluxo	34
2.5. Velocimetria por imagem de partículas (PIV).....	35
2.5.1. PIV aplicado em escoamento monofásico.....	35
2.5.2. PIV aplicado em escoamento bifásico.....	39
2.6. Sensor wire-mesh	41
2.6.1. Princípio de operação do sensor WMS.....	41
2.7. Instrumentação aplicada em duto anular	44
2.8. Escoamento pistonado	45
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....	47
3.1. Contextualização do PIV	47
3.1.1. Funcionamento do PIV	48
3.1.2. Método da correlação cruzada de imagens.....	49
3.1.3. Autocorrelação (único quadro/exposição dupla) (single frame/double exposure)	51
3.1.4. Correlação cruzada (duplo quadro/exposição dupla) (double frame/double exposure).....	52
3.2. Operações de filtragem nas imagens PIV	53
3.2.1. Filtros de vizinhança linear e não linear	53
3.2.2. Filtro de suavização	54
3.2.3. Transformada de Fourier para o processamento de imagens no domínio da frequência.....	54
3.3. Laser Nd-YAG	56
3.4. Partículas traçadoras	56
3.5. Sistema WMS	58
3.5.1. Permissividade relativa complexa	58
3.5.2. Medição teórica da permissividade complexa.....	59
3.5.3. Modelos de relação para o sensor WMS em escoamentos bifásicos.....	60

3.6.	Análise de escoamento turbulento em duto anular.....	62
3.6.1.	Análise da tensão de cisalhamento de Reynolds em duto anular.....	62
3.7.	Escoamento turbulento em uma tubulação	64
3.7.1.	Tensão de cisalhamento de Reynolds	66
3.7.2.	Análise de Turbulência	67
CAPÍTULO 4.	TRABALHO EXPERIMENTAL	70
4.1.	Duto anular.....	70
4.2.	Descrição do circuito experimental.....	71
4.3.	Descrição dos equipamentos	72
4.3.1.	Sistema de suprimento de ar	72
4.3.2.	Sistema de suprimento de água e óleo	73
4.3.3.	Medidores de vazão.....	74
4.3.4.	Calibração dos medidores de vazão	76
4.4.	Montagem da seção de teste do PIV no tubo horizontal.....	77
4.5.	Montagem da seção de teste do PIV no duto anular	81
4.6.	Sistema de instalação proposto do sensor AWMS no duto anular.....	84
4.6.1.	Princípio de funcionamento do sensor AWMS no duto anular.....	88
4.6.2.	Câmera de vídeo de Alta velocidade.....	88
CAPÍTULO 5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
5.1.	Resultados experimentais com PIV em tubo horizontal	90
5.1.1.	Escoamento laminar em um tubo horizontal.....	90
5.1.2.	Escoamento turbulento em um tubo horizontal	93
5.1.3.	Tensão de cisalhamento de Reynolds para escoamento turbulento em um tubo horizontal	94
5.2.	Resultado experimental do PIV no duto anular	96
5.2.1.	Escoamento laminar em um duto anular	96
5.2.2.	Velocidade axial média quadrática, U_{rms} , para escoamento laminar no duto anular.....	99
5.2.3.	Escoamento turbulento no duto anular.....	99
5.2.4.	Velocidades quadráticas médias U_{rms} ou flutuações da velocidade na direção horizontal (axial) no duto anular	100
5.2.5.	Velocidades quadráticas médias V_{rms} ou flutuações da velocidade na direção vertical (radial) no duto anular	101
5.2.6.	Tensão de cisalhamento de Reynolds no duto anular	102
5.3.	Análise de turbulência em duto anular.....	103

5.3.1.	Tensão de cisalhamento de Reynolds e perfil de velocidade de escoamento turbulento em duto anular para um número de Reynolds de 8587, em 5 graus de inclinação	104
5.3.2.	Tensão de cisalhamento de Reynolds e perfil de velocidade de escoamento turbulento em duto anular para um número de Reynolds de 7106, em 2 graus de inclinação.	105
5.4.	Escoamento bifásico ar-água para padrão pistonado no duto anular.....	110
5.4.1.	Perfis da velocidade média em padrão pistonado no duto anular.....	113
5.4.2.	Funções de densidade de probabilidade PDF da velocidade axial média.	114
5.4.3.	Tensões de cisalhamento de Reynolds	118
5.5.	Processamento e redução de dados AWMS	120
5.5.1.	Fração de vazio medida pela AWMS	122
5.5.2.	Caracterização de escoamento pistonado no duto anular, usando câmera de Alta velocidade, AWMS e PIV.....	124
5.5.3.	Distribuição Espectral de Potência, PSD.....	128
5.5.4.	Tratamento de sinais para cálculo de frequência de passagem.....	129
5.5.5.	Câmera de alta velocidade análise da velocidade de passagem das bolhas.....	130
5.6.	Escoamentos laminares, turbulentos e estratificados em geometria anular com diâmetro externo de 155 mm e interno de 125 mm.	132
5.6.1.	Escoamentos monofásicos laminares.	133
5.6.2.	Escoamento monofásico turbulento.....	137
5.6.3.	Comparação de perfis de velocidade média laminar e turbulento.....	138
5.6.4.	Tensão de cisalhamento de Reynolds para os escoamentos turbulentos. ..	140
5.6.5.	Flutuações na direção axial para escoamentos turbulentos.	141
5.6.6.	Flutuações na direção radial para escoamento turbulento.	142
5.6.7.	Análise de turbulência em escoamento monofásico turbulento.	145
5.6.8.	Análise tensões de cisalhamento e a lei de parede dos escoamentos turbulentos.	147
5.6.9.	Velocidade axial média calculada experimentalmente para escoamento estratificado.	151
5.6.10.	Análise da flutuação axial e radial para escoamento estratificado.	153
5.6.11.	Tensão de cisalhamento de Reynolds em escoamento estratificado.	154
CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS.....		158
APÊNDICE A. PUBLICAÇÕES SELECIONADAS.....		169

APÊNDICE B. ESCOAMENTOS BIFÁSICO AR-ÁGUA PARA PADRÃO PISTONADO NO DUTO ANULAR.	170
APÊNDICE C. PROCESSAMENTO E REDUÇÃO DE DADOS AWMS.....	185
APÊNDICE D. ESCOAMENTOS LAMINARES NOVA GEOMETRIA DUTO ANULAR RE~ 300 E RE 500.....	189
APÊNDICE E. CALCULO DA FRAÇÃO DE VAZIO E NÚMERO DE REYNOLDS PARA ESCOAMENTO ESTRATIFICADO.	190
APÊNDICE F. INCERTEZA EXPERIMENTAL.	193

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

Escoamentos bifásicos são observados em vários processos naturais e industriais, como, por exemplo, na produção de petróleo, onde geralmente uma mistura imiscível de óleo e gás é conduzida através de dutos, essa assumindo diversas configurações espaciais ou padrões de escoamento. Na prática, dada sua confiabilidade, a aplicação de modelos físicos dependentes do padrão de escoamento é a abordagem comumente utilizada para a previsão dos parâmetros do escoamento bifásico, como fração de vazio, gradiente de pressão bifásico, perfis de velocidade e deslizamento. O padrão de escoamento apresenta-se como uma importante informação *a priori* para a determinação dos fluxos volumétricos e demais parâmetros do escoamento bifásico, carregando informações sobre a fenomenologia do escoamento. O setor energético brasileiro tem parte substancial de sua matriz energética baseada na indústria de petróleo. Em face disso, pesquisas relacionadas à produção de petróleo e gás natural têm surgido no sentido de contribuir com a indústria petrolífera, para que a demanda do setor energético possa ser atendida. Nesse contexto, encontram-se os estudos relacionados aos escoamentos multifásicos, entre os quais, os escoamentos bifásicos.

Os escoamentos bifásicos, em geral, são encontrados na forma das seguintes misturas:

- i) Gás-sólido ou líquido-sólido. Exemplos: leitos fluidizados borbulhantes ou circulantes, biorreatores, transporte pneumático, reações de síntese, reações de oxidação de minérios, processos de combustão e gaseificação, transporte de material particulado e recuperação de calor. Aplicações: indústria farmacêutica, metalúrgica e petroquímica.
- ii) Gás-líquido: Exemplos: colunas de bolhas, torres de resfriamento, escoamentos condensadores de vapor, escoamentos de óleo-gás e de água-gás em tubulações, microbiologia, refrigeração e ventilação industrial, e, produção e transporte de petróleo e gás natural. Aplicações: indústria petroquímica e de refrigeração.
- iii) Líquido-líquido. Exemplos: escoamento composto por óleo (leve ou pesado) e água em tubulações em produção e transporte de petróleo. Aplicações: indústria de petróleo.

Referente à produção e transporte de petróleo, óleo, água e gás são conduzidos em tubulações na forma de misturas imiscíveis e em variados padrões de escoamento. Neste trabalho, utiliza-se instrumentação capaz de levantar dados detalhados locais e médios, como velocimetria por imagens de partículas (PIV), sensor de impedância elétrica de malha de fios de

alta frequência de aquisição (“wire-mesh”) adaptada a um canal de geometria anular (AWMS) e câmera de alta velocidade, com o objetivo de compreender fenômenos físicos relacionados ao escoamento bifásico gás-líquido. Entre outros, a relação entre dissipação de energia e distribuição de tamanho de gotículas e bolhas, fração de fase local, distribuição média temporal de fração volumétrica, campos de velocidades, perfis de velocidade e características dos escoamentos turbulentos em padrões de escoamento estratificado, bolhas e bolhas alongadas (pistonado). Esta pesquisa passa pela montagem e calibração de instrumentos de medição; porém, em última instância, tem como objetivo geral o estudo e compreensão do comportamento ou características do escoamento bifásico em uma geometria diferenciada, duto anular de grande porte. Assim sendo, o presente trabalho tem como objetivos específicos:

- i) Adaptação, validação e documentação da calibração de instrumentos: sensor do tipo “*wire mesh*”, sistema PIV e câmera de alta velocidade, para análise dos escoamentos.
- ii) Caracterização do óleo e da água através de uma bancada experimental para conhecer as características elétricas, ganho e fase para diferentes frequências do sinal de entrada.
- iii) Geração de imagem tridimensional virtual dos padrões de escoamento em dutos anulares, além de uma imagem lateral para comparação sincronizada com as imagens obtidas via câmera de alta velocidade.

O trabalho foi organizado nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2: definição preliminar dos principais conceitos e das variáveis do escoamento bifásico mencionadas neste trabalho; revisão bibliográfica sobre escoamentos bifásicos gás-líquido, escoamentos em dutos anulares, mapas de fluxo e instrumentos de medição PIV, “sensor wire mesh” (WMS) e câmera de alta velocidade.
- Capítulo 3: marco teórico referente às características do sistema PIV, características elétricas do sensor tipo *wire-mesh* e modelos de turbulência.
- Capítulo 4: apresentação da proposta experimental desenvolvida neste trabalho, como: experimentos com PIV, sensor AWMS e câmera de alta velocidade.
- Capítulo 5: resultados obtidos e perspectivas de futuras.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como objetivo apresentar o estado da arte alusivo aos tópicos que constituem o projeto de pesquisa, mostrando os estudos relacionados ao escoamento bifásico gás-líquido, escoamentos em dutos anulares, mapas de fluxo e, especialmente, aos instrumentos de medição: velocimetria por imagem de partículas (PIV) e sensor “wire-mesh”. Iniciando o capítulo, são introduzidas as definições de alguns dos termos básicos do escoamento bifásico.

2.1. Terminologia básica do escoamento bifásico gás-líquido

Partindo do princípio de que o objeto deste estudo consiste em um escoamento gás-líquido, o subscrito a é utilizado para o ar e w para a água, com ambas as fases escoando de forma simultânea em uma tubulação com área de seção transversal A , as frações volumétricas médias de injeção do ar e da água são dadas respectivamente por:

$$C_a = \frac{Q_a}{Q_a + Q_w} \text{ e } C_w = \frac{Q_w}{Q_a + Q_w}, \quad (2.1)$$

Sendo Q_a e Q_w respectivamente, as vazões volumétricas de injeção do ar e da água.

A partir das vazões volumétricas de injeção e da área de seção transversal do tubo, são calculados os fluxos volumétricos, também chamados de velocidades superficiais, tanto do ar como da água, respectivamente da forma:

$$j_a = \frac{Q_a}{A} \text{ e } j_w = \frac{Q_w}{A} \quad (2.2)$$

De maneira geral, tomarei por opção o termo fluxo volumétrico preferencialmente à velocidade superficial no presente texto.

Das equações (2.1) e (2.2) e obtêm-se as relações entre as frações volumétricas de injeção e as velocidades superficiais, dadas por:

$$C_a = \frac{j_a}{j_a + j_w} \text{ e } C_w = \frac{j_w}{j_a + j_w} \quad (2.3)$$

A velocidade *in situ*, diferentemente do fluxo volumétrico, corresponde à velocidade média real de cada fase, o que corresponde à vazão volumétrica da fase passando por uma área menor do que a área transversal do tubo, isto é, a área da seção transversal ocupada pela própria fase. Calculadas a partir da razão entre a vazão volumétrica e a área ocupada pela fase, as velocidades *in situ* para o ar e para a água são dadas, respectivamente, por:

$$V_a = \frac{Q_a}{A_a} \text{ e } V_w = \frac{Q_w}{A_w} \quad (2.4)$$

A fração volumétrica *in situ* de uma fase é dada por uma média temporal para certo trecho de tubo. É considerada como uma grandeza local, isto é, para um comprimento diferencial de tubo δL . Assim, as frações volumétricas *in situ*, respectivamente para o ar e para a água, são definidas da forma:

$$\varepsilon_a = \frac{A_a \delta L}{A \delta L} = \frac{A_a}{A} \text{ e } \varepsilon_w = \frac{A_w \delta L}{A \delta L} = \frac{A_w}{A} \quad (2.5)$$

No caso de uma das fases ser gasosa, sua fração volumétrica *in situ* é usualmente chamada de fração de vazio.

Os fluxos volumétricos de cada fase e as respectivas frações volumétricas *in situ*, a partir das equações (2.2) e (2.5) estão relacionados entre si da seguinte forma:

$$V_a = \frac{j_a}{\varepsilon_a} \text{ e } V_w = \frac{j_w}{\varepsilon_w} \quad (2.6)$$

A velocidade da mistura é definida dividindo a vazão volumétrica total pela seção transversal do tubo, ou também, pela soma dos fluxos volumétricos:

$$j_m = \frac{Q_a + Q_w}{A} = j_a + j_w \quad (2.7)$$

Um importante fenômeno característico de escoamentos bifásicos é o escorregamento s provocado pelas diferenças de densidades e/ou viscosidades entre os fluidos.

Quando dois fluidos escoam juntos em uma tubulação, a fração volumétrica *in situ* é, de maneira geral, diferente da fração volumétrica de injeção. O *holdup ratio*, de acordo com Oliemans (1986), é definido como uma razão envolvendo duas outras razões: a razão das frações volumétricas *in situ* ($\varepsilon_w/\varepsilon_a$) sobre a razão das frações volumétricas de injeção (C_w/C_a), o que também corresponde à razão das velocidades das fases *in situ*:

$$s = \frac{\frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_a}}{\frac{C_w}{C_a}} = \frac{V_a}{V_w} \quad (2.8)$$

Quando o escorregamento s é maior do que a unidade, significa que a água esta se acumulando no tubo e o ar esta escoando mais rapidamente. Por outro lado, quando o escorregamento s é menor do que a unidade, é o ar que está se acumulando no tubo e a água que está escoando mais rapidamente.

2.2. Escoamentos gás-líquido

É chamado de escoamento bifásico gás-líquido em tubos o escoamento simultâneo de duas fases imiscíveis, sendo uma gasosa e outra líquida, ambas dentro de um mesmo duto. O escoamento da mistura pode ocorrer assumindo diferentes configurações geométricas, chamadas de padrões de escoamento, sendo tais padrões classificados pelo arranjo das fases.

Dentre os trabalhos existentes, podemos ressaltar inicialmente o trabalho de Dukler (1985), que consistia em sistemas de ar e de abastecimento de água e seções de testes feitas de dois tubos transparentes com diâmetro interno de 2,5 e 5,1 cm, apoiados sobre uma estrutura de aço capaz de variar o ângulo de inclinação, da horizontal para a vertical.

Dados de padrões de escoamento, quedas de pressão e *holdup* foram obtidos por Spedding e Spence (1993), para escoamentos bifásicos ar-água em uma seção de teste 0,0935 m i.d., 2,021 m de comprimento de um tubo horizontal. Foram obtidas vazões de ar de até 575 kg/h e de água de até 9600 kg /h.

De acordo com Meng (2001), correspondem aos parâmetros mais importantes envolvidos no desenvolvimento de um escoamento bifásico gás-líquido: a geometria tubular (diâmetro da tubulação e seu ângulo de inclinação), as condições operacionais de vazão, pressão e temperatura, e também as propriedades físicas dos fluidos, tais como densidade, viscosidade e tensão superficial.

Shoham (2006) apresentou uma classificação bastante aceita para os padrões de escoamento gás-líquido. Nela, os padrões de escoamento tradicionais para escoamento vertical ascendente são: bolhas (*bubble*), pistonado (*slug*), agitante (*churn*), anular (*annular*) e bolhas dispersas (*dispersed-bubble*). Já para escoamento horizontal e ligeiramente inclinado, os padrões típicos são: estratificado liso (*stratified-smooth*), estratificado ondulado (*stratified-wavy*), bolhas alongadas (*elongated-bubble*), pistonado (*slug*), anular (*annular*), anular ondulado (*wavy-annular*) e bolhas dispersas (*dispersed-bubble*), conforme é mostrado na Figura 2.1.

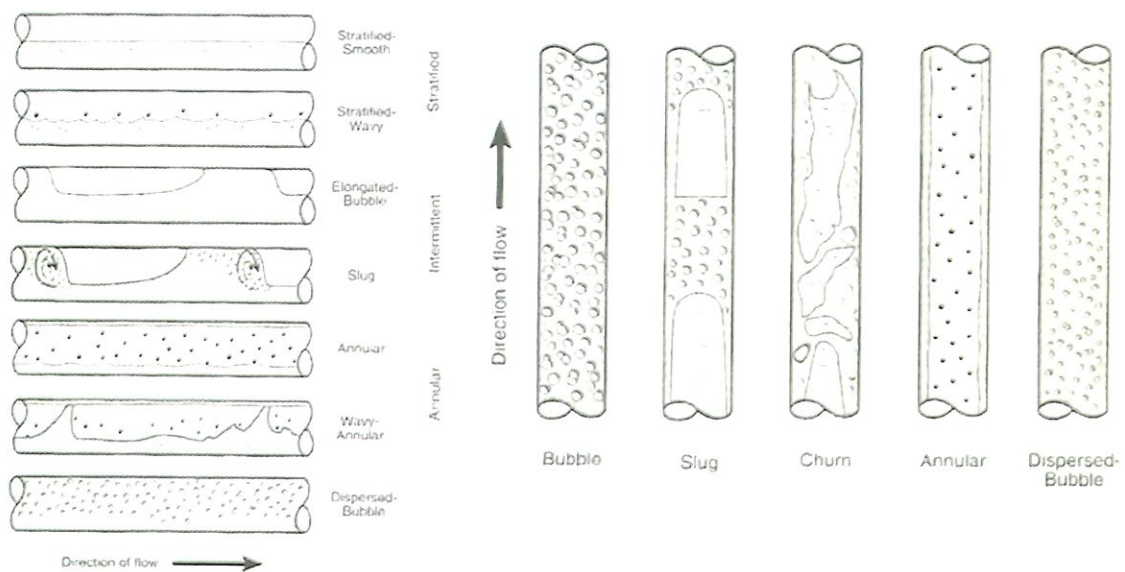


Figura 2.1. Padrões de escoamento para escoamento bifásico gás-líquido atualmente aceitos: (a) escoamento horizontal e levemente inclinado, (b) escoamento vertical ascendente, Extraída de Shoham (2006).

Uma análise teórica do escoamento gás-líquido entre placas verticais foi realizado por Trifonov (2010), utilizando as equações de Navier-Stokes em sua forma completa para descrever a hidrodinâmica da fase líquida; para as equações em fase gasosa, foi usado o método Benjamin-Miles, onde a fase líquida é uma pequena perturbação para o escoamento de gás turbulento.

Qi et al. (2012) realizaram estudos experimentais em escoamento gás-líquido num tubo vertical para o desenvolvimento de modelos físicos mais robustos para prever com precisão os parâmetros essenciais interfaciais do escoamento bifásico. Nesta primeira parte, foram obtidos dados experimentais em um tubo de grande diâmetro, com um diâmetro interno de 195,3 milímetros, a técnica wire-mesh foi usada.

Liu et al. (2012) apresentam modelo matemático para escoamento bifásico gás-líquido em tubo horizontal. Os padrões de escoamento e distribuição de fração de vazio em tubos circulares, com diâmetros de 7 e 10 mm, nas mais diversas gravidades de $10^{-4} 4g_0$, $0.17g_0$, $0.38g_0$, and g_0 ($g_0 = 9.8 \text{ m/s}^2$), são apresentados.

Experiências com escoamentos estratificados gás-líquido na horizontal foram realizadas num tubo liso de acrílico transparente, com um diâmetro interno de 24 mm e comprimento de 12,35 m. O tubo foi cuidadosamente nivelado e colocado em uma estrutura de aço que poderia tomar pequenas inclinações de até $\pm 3^\circ$, Tzotzi e Andritsos (2013).

Zhang et al. (2013) realizaram experimentos com escoamento ar-água, num tubo de diâmetro interno na entrada de 60 mm. As gamas de velocidades superficiais do gás e líquido eram 3-32 m/s e 0,02-0,17 m/s, respectivamente, com os padrões de escoamento: estratificado ondulado, pistonado e escoamento anular.

A partir da análise do escoamento estratificado, Taitel e Dukler (1976) apresentaram modelos fenomenológicos para determinar a transição de padrões de escoamento, para em escoamentos gás-líquido em dutos horizontais, com equações de fechamento para a previsão de fração volumétrica “*in-situ*” e queda de pressão. O escoamento estratificado foi baseado na existência de uma interface de separação entre as fases com geometria plana. Foi proposta uma carta de fluxo para o escoamento gás-líquido e seu trabalho tornou-se referência fundamental para diversos trabalhos a respeito da previsão de fronteiras de transição.

2.3. Escoamentos em dutos anulares

Quanto à identificação de padrões de escoamento em dutos anulares, observa-se, na literatura, que a maioria dos trabalhos apresenta discussões relativas aos escoamentos gás-líquido. Por exemplo, o trabalho apresentado por Sadatomi et al. (1982), precursor na identificação de padrões de escoamento em dutos anulares. Em escoamento ascendente gás-líquido em dutos anulares concêntricos e excêntricos, se apresentam as análises feitas por Kelessidis e Dukler (1989). Classificação de padrões de escoamento, cartas de fluxo, dados de queda de pressão e fração volumétrica “*in-situ*” do líquido foram oferecidos por Caetano et al.

(1992). Kelessidis e Dukler (1989) realizaram experimentos e análises teóricas do mesmo escoamento. Os autores argumentam que a abordagem de diâmetro hidráulico nem sempre é apropriada para a modelagem do escoamento em dutos anulares, Figura 2.2.

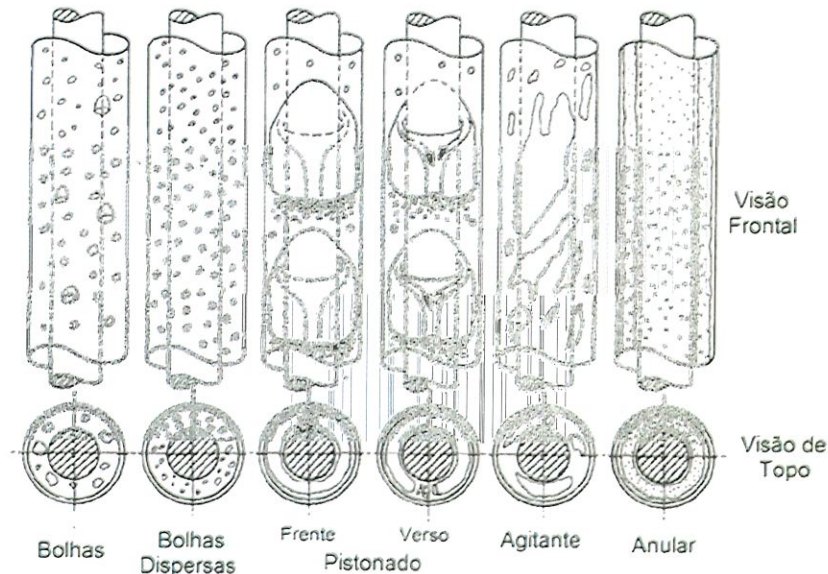


Figura 2.2. Padrões de Escoamento observados por Caetano et al. (1992).

Em dimensões reduzidas, medindo queda de pressão, fração volumétrica e catalogando padrões de escoamento, temos o trabalho de Ekberg et al. (1999), em dutos anulares. Recentemente, no trabalho de Mendes (2012), foi analisado o escoamento gás-líquido em duto anular grande com alta razão de viscosidade. Observaram-se os padrões estratificado, estratificado ondulado, bolhas alongadas e pistonado, na horizontal. Em dutos inclinados, apenas os padrões bolhas alongadas e pistonado foram observados. Não foram encontradas na literatura análises referentes a escoamentos líquido-líquido em dutos anulares.

Percebe-se, através da revisão da literatura, que não foi encontrado trabalho onde aplicasse instrumentação avançada para levantamento de dados detalhados do escoamento gás-líquido em dutos anulares grandes, como perfis de velocidade, perfis de fração de fase, distribuição de bolhas e velocidades instantâneas. Uma possível explicação para esse fato é a abordagem vigente, baseada no conceito do diâmetro hidráulico, que tem limitações. A contribuição principal desta tese será a obtenção de dados detalhados de escoamento bifásico em dutos anulares grandes, que sirvam para validação e aperfeiçoamento de modelos matemáticos existentes na literatura e desenvolvimento de novos modelos para a previsão de fração volumétrica e queda de pressão em escoamento bifásico gás-líquido.

2.4. Mapas de fluxo

As técnicas de observação visual do escoamento através de tubos transparentes eram as mais utilizadas para definição de padrões de escoamento. Os mapas de fluxo surgem como instrumentos gráficos, em que dados de entrada como, por exemplo, as velocidades superficiais dos fluidos ou fluxos volumétricos, são utilizados para a determinação do padrão de escoamento. Os mapas são gerados a partir de dados experimentais, onde determinam-se os padrões de escoamento em função das vazões volumétricas, fração de vazio e outras propriedades dos fluidos. Além de permitir a identificação do padrão, os mapas de fluxo têm importância na definição de condições operacionais de equipamentos, sendo utilizados para evitar a transição para padrões indesejáveis. A grande variedade de mapas de fluxo encontrada na literatura pode ser subdividida em (i) mapas com coordenadas dimensionais e (ii) adimensionais, de acordo com as variáveis das coordenadas do gráfico cartesiano que usualmente expressam os padrões.

Os mapas dimensionais são desenhos que mostram os limites de transição entre os padrões de escoamento, normalmente em função dos fluxos volumétricos ou velocidade de mistura vs. fração de injeção, e são ilustrados com eixos de forma logarítmica ou linear. Usam-se parâmetros dimensionais para representar as velocidades superficiais de cada fase, em geral, o gás e o líquido. Em escoamentos ascendentes verticais, foram propostos mapas de fluxo por Hewitt e Roberts (1969), assim como modelos fenomenológicos para as transições de padrões de escoamento bifásico em tubos horizontais Taitel e Dukler (1976).

Um enfoque mecanicista para escoamento bifásico foi dado pelos trabalhos de Baker (1954) e Taitel e Dukler (1976) para a geração de mapas de fluxo. Um tratamento mais completo e essencial das transições de escoamentos bifásicos foi oferecido por Barnea e Taitel (1986).

Dados experimentais, apresentados em função dos fluxos volumétricos nos eixos coordenados, são oferecidos no trabalho de Mandhane et al. (1974). A contribuição principal são os mapas de fluxo experimentais. Entretanto, esses aplicam-se apenas às condições nas quais foram obtidos, ou seja, para uma geometria específica de tubo e fluidos, limitando sua utilização.

A primeira carta de fluxo gás-líquido foi indicada por Baker (1954) e foi feita a partir de dados experimentais de escoamentos ar-água e ar-óleo na horizontal, em que os eixos são fundamentados nos fluxos mássicos (G) de cada fase, multiplicados por fatores que levam em consideração as massas específicas, viscosidades e tensões interfaciais das fases, Figura 2.3.

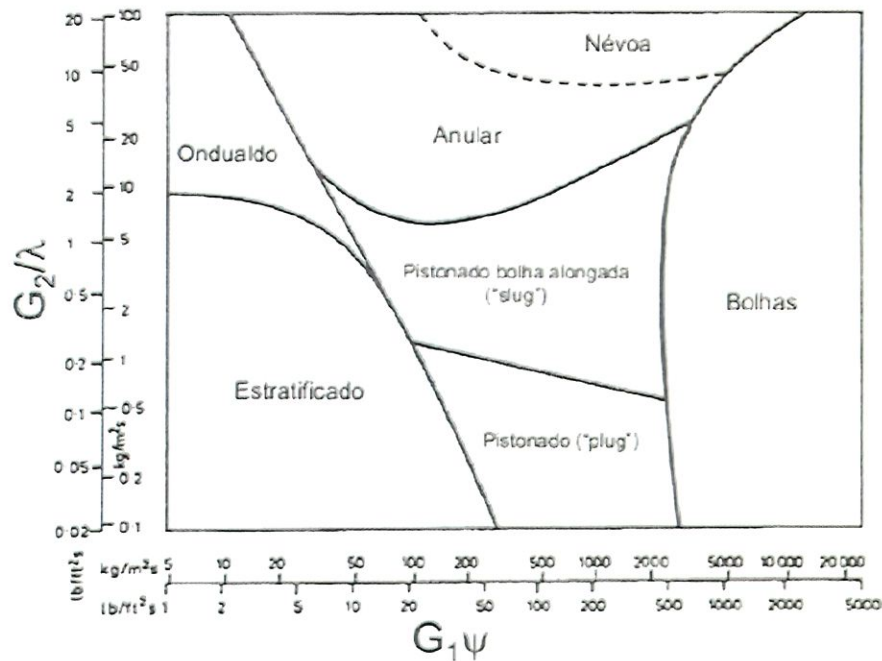


Figura 2.3. Carta de fluxo de Baker (1954) G_1 : fluxo mássico de líquido, G_2 : fluxo mássico de gás).

2.5. Velocimetria por imagem de partículas (PIV)

A Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV) é uma técnica de medição óptica utilizada principalmente para aplicações de escoamento monofásico de fase líquida ou gasosa. Essa técnica de medição também tem sido utilizada para estudo de escoamento bifásico. Entretanto, existem poucos trabalhos sobre escoamento bifásico em um duto anular grande. A maioria dos trabalhos foi feita em tubos ou canais usando, além do PIV, velocimetria por laser Doppler (LDV) e simulação numérica direta (DNS). São analisados alguns trabalhos selecionados das últimas duas décadas, em que são descritas as diferentes estatísticas de turbulência em tubos e dutos.

2.5.1. PIV aplicado em escoamento monofásico

Medições com PIV em um escoamento turbulento plenamente desenvolvido de água, com um número de Reynolds de 5.370 em uma tubulação com diâmetro interno de 40 mm, foram apresentadas por Meyer e Westerweel (2000). Os resultados de velocidade média axial,

Tensões de Reynolds e flutuações de velocidade (U_{rms} e V_{rms}) são comparados com os resultados obtidos via DNS por Eggels e Unger (1994).

Westerweel et al. (1996) e Toonder et al. (1997) analisaram estatísticas de turbulência utilizando DNS, PIV e LDV para comparar as respostas, como: velocidade axial, intensidades de turbulência axial e radial (U_{rms} e V_{rms} respectivamente), tensões de Reynolds, normalizadas pela velocidade de cisalhamento como função da distância da linha central, em um escoamento tubular.

Existem diversas análises de escoamentos turbulentos em um tubo, que foram conduzidas usando DNS, entre elas podemos citar os trabalhos de Loulou et al. (1997), Moser et al. (1999), Veenman (2004), Boersma (2011), Sohrab Sattarzadeh Shirvan (2011) e Chin et al. (2015), onde foram mostrados parâmetros como estatísticas da turbulência, espectros de energia, funções de autocorrelação, velocidades de flutuação, tensões de cisalhamento de Reynolds, velocidade média, função densidade de probabilidade (PDF), momentos de flutuação, densidade espectral de potência (PSD) e distribuição de velocidade em relação ao tempo, para escoamento turbulento em tubos.

Resultados estatísticos de turbulência dos quatro momentos são apresentados por den Toonder e Nieuwstadt (1997): espectros de energia perto da parede, perfil de velocidade, estatísticas de U_{rms} e V_{rms} e tensões de cisalhamento, no intervalo de números de Reynolds de 5000 a 25000. Eles fizeram uma comparação entre velocimetria por laser Doppler (LDV) e DNS.

Peixinho et al. (2005), usando LDA, analisaram escoamentos laminares, em transição e turbulentos em um tubo cilíndrico de 5,5 m de comprimento e 30 mm de diâmetro interno, mostrando que os perfis de flutuações de velocidade U_{rms} e V_{rms} para fluidos newtonianos e não newtonianos são semelhantes, exceto nas proximidades da parede, onde a intensidade de turbulência é maior para os fluidos não-newtonianos estudados.

Pruvost et al. (2000), usando PIV, estudaram as componentes e características da turbulência, (U_{rms} e V_{rms}) em um escoamento decendente, induzido por uma entrada tangencial em um anel. Um escoamento turbulento, com número de Reynolds 24.000 foi estudado por Christensen (2004), usando PIV. Concluiu-se que as flutuações de velocidade U_{rms} e V_{rms} e os tensores de Reynolds são muito sensíveis perto da parede do tubo. Westerweel e Scarano (2005), em seu trabalho com PIV, utilizaram a função de densidade de probabilidade (PDF) como técnica analítica, onde um valor de limiar pode ser aplicado para efetivamente detectar vetores espúrios.

Velocimetria por Imagem de Partícula Estereoscópica (SPIV) foi aplicada para medir o campo de velocidade instantânea na seção transversal de uma tubulação, com um diâmetro interno de 40 mm e um comprimento total de 28 m, utilizando água como fluido de teste. Este trabalho foi desenvolvido por Van Doorne e Westerweel (2007), que falaram do efeito produzido pelo erro na medição de tensoes de cisalhamento de Reynolds em escoamentos turbulentos. Um campo vetorial de velocidade instantânea, calculado através de PIV, para dois diferentes números de Reynolds em uma contração repentina, foi obtido por (Ozalp et al. (2007). Água foi usada como o fluido de trabalho no sistema, onde as estatísticas da velocidade instantânea, campo de velocidade e turbulência foram calculadas.

Estatísticas da velocidade média e campo vetorial de escoamento turbulento foi o trabalho apresentado por Carr et al. (2009) e Zhu et al. (2013) onde um novo método de pré-processamento de imagem melhorado é apresentado neste artigo, que expandindo o tradicional tamanho da janela para imagens PIV.

Soares et al. (2013) apresentaram um protocolo alternativo para ser utilizado com a técnica PIV. Ela foi aplicada em um escoamento de água para uma tubulação translúcida, onde a transformada *wavelet* foi implementada para representar um sinal com a possibilidade de fornecer a correlação entre o tempo e a composição de frequência.

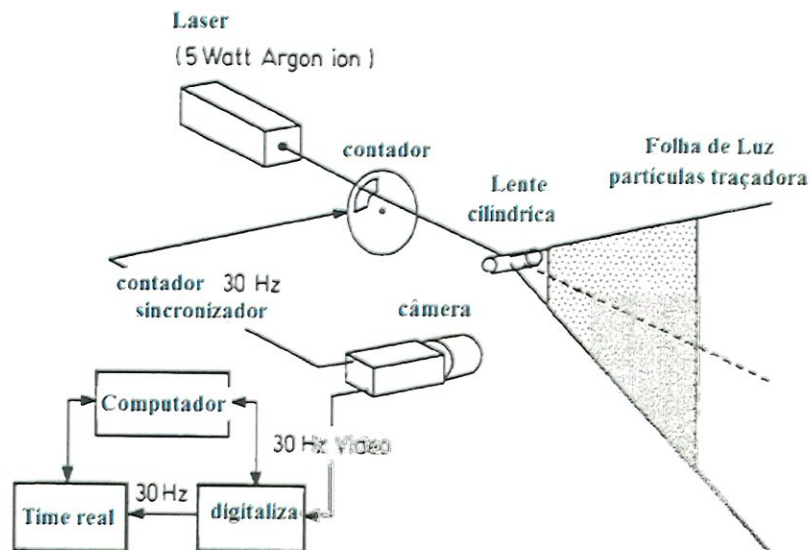


Figura 2.4. Esquemático do sistema de iluminação e de imagem para a geração da imagem de PIV, por Willert e Gharib (1991).

Imagens gravadas à taxa de 30 Hz e com PIV com um único laser foi o trabalho desenvolvido por Willert e Gharib (1991), Figura 2.4, onde as medições de velocidade foram

comparadas com os dados obtidos pela medição direta da separação dos pares de partículas individuais. Os dados de velocidade recuperados são utilizados para calcular a distribuição de vorticidade espacial e temporal. Apresenta-se o potencial do sistema PIV, além do fato de que as imagens podem ser capturadas em tempo real.

Um sistema de micro resolução de imagem de partículas ou micro-PIV foi desenvolvido por Santiago et al. (1998) para medir campos de escoamentos instantâneos em dispositivos fluídicos com escala de micrômetros. O sistema utiliza um microscópio de epifluorescência para partículas de 100-300 nm de diâmetro, e uma câmera CCD intensificada para gravar campos de partículas dispersas com alta resolução. Os vetores do campo de velocidade puderam ser medido com resoluções espaciais de até $6.9 \times 6.9 \times 1.5 \mu m$. Os campos vetoriais são analisados usando um algoritmo de correlação cruzada, duplo-frame, gravando duas imagens em um intervalo de tempo determinado para obter a velocidade do fluido por meio do deslocamento da partícula de uma imagem a outra.

Um sistema PIV foi desenvolvido por Meinhart et al. (1999) para medir campos de velocidade da ordem de μm de resolução espacial. A técnica utiliza partículas de diâmetro 200 nm. Demonstrou-se que a técnica de micro-PIV pode fornecer medições de campos de velocidade com resoluções espaciais que se aproximam de $0,9 \mu m$, usando 50% de sobreposição.

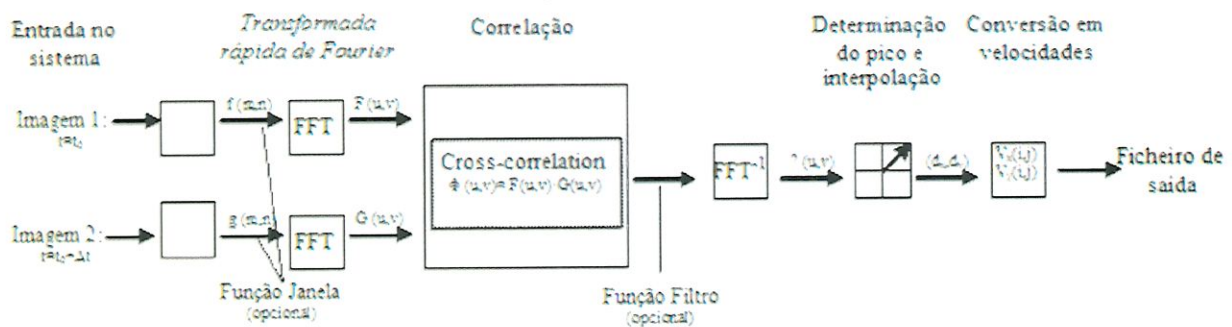


Figura 2.5. Esquema de explicativo do processo *cross-correlation*, Willert e Gharib (1991).

O trabalho de Simão et al. (2006) tem como objetivo principal verificar a sensibilidade dos resultados quanto aos parâmetros de tratamento de dados do sistema PIV. É possível concluir que o tipo de correlação que melhor permite caracterizar o escoamento é a *adaptive-correlation*, Figura 2.5. Para a gama de tamanhos pesquisado, não se registra sensibilidade ao

valor do tamanho final das áreas de interrogação. Quanto à sobreposição das áreas de interrogação, obtêm-se resultados fisicamente aceitáveis para 25% e 50%, esta é a porcentagem da sobreposição de área das janelas; o aumento da sobreposição pode afetar os segundos momentos das séries temporais, possivelmente por reduzir a confiabilidade do algoritmo de validação.

Elsinga et al. (2006) descrevem os princípios de um novo sistema de PIV 3D baseado na iluminação, gravação e reconstrução de partículas dentro de um volume de medição 3D. A técnica faz uso de vários pontos de vista simultâneos das partículas iluminadas e sua reconstrução 3D como uma distribuição de intensidade de luz por meio da tomografia óptica. O estudo centra-se na precisão do processo de reconstrução.

2.5.2. PIV aplicado em escoamento bifásico

2.5.2.1. PIV aplicado escoamento bifásico líquido-líquido

Trabalhos sobre escoamentos bifásicos líquido-líquido (água-óleo) foram conduzidos por Elseth (2001), Kumara et al. (2010a) e Kumara et al. (2010b), onde estatísticas foram analisadas, como distribuição de velocidade axial, flutuações de velocidade (*rms*), tensão de Reynolds e intensidade turbulenta. O experimento foi feito em uma tubulação horizontal de 15 m e com 56 mm de diâmetro, e os resultados obtidos pelo PIV e LDA foram comparados entre si.

2.5.2.2. PIV aplicado escoamento bifásico ar-líquido

Ayati et al. (2014) e Ayati et al. (2015) usaram PIV para medir um escoamento turbulento estratificado ar-água. Eles compararam seus dados com resultados de DNS em uma tubulação horizontal de 31 m de comprimento e 100 mm de diâmetro, mostrando bom acordo. Perfis de velocidade local e perfis de turbulência no plano vertical, através do centro da tubulação, foram medidos utilizando PIV por Vestøl e Melaaen (2007). O experimento foi executado em escoamento ar-água em uma tubulação de 14 m de comprimento, onde propriedades de turbulência foram calculadas a partir dos perfis de velocidade. Um estudo experimental foi realizado por Birvalski et al. (2016) em escoamento estratificado ondulado de

ar e água através de uma tubulação horizontal de diâmetro interno de 5 cm com um comprimento total de 10 m. Foi utilizado PIV para medir propriedades de turbulência, axiais e radiais, e perfis de tensões de Reynolds. Outros trabalhos de escoamentos ar-água foram apresentados por Birvalski et al. (2014), em um tubo transparente de 50 mm diâmetro interno e 10,3 m de comprimento. Foram medidas as Tensões de Reynolds, perfis e campos de velocidades radial e axial, por meio de PIV.

A dispersão de bolhas de ar em escoamento dentro de uma caixa foi analisada por Hassan et al. (1992). A técnica PIV é utilizada a fim de obter campos de velocidades de maneira não invasiva. O método proporciona não só a visualização das várias estruturas do campo de velocidades, mas também produzem dados quantitativos da velocidade instantânea de ambas as fases de modo simultâneo. Foram obtidos resultados que indicam que o PIV é uma ferramenta eficaz para o estudo das interações específicas que ocorrem entre componentes numa ampla variedade de sistemas multifásicos.

Desfocalização Digital em Velocimetria por Imagem de Partículas (DDPIV) foi estudada por Pereira e Gharib (2002) e é a extensão natural de técnicas PIV planares para a terceira dimensão espacial. Oferecem-se detalhes sobre o conceito óptico de desfocagem. O modelo óptico e processos computacionais são apresentados com o propósito específico de mapear, entre outros, a distribuição de tamanho, a fração de vazios local associada e a velocidade de formação de bolhas ou de partículas no escoamento bifásico.

Com o anterior descrito acerca de técnicas PIV existe grande quantidade de trabalhos realizados em tubos para escoamento monofásico onde se descrevem diferentes técnicas estatísticas que são comparadas com análise numéricas, enquanto os trabalhos em escoamento bifásico líquido-líquido e ar-líquido são escassos. Conclui-se que escoamentos ar-líquido no padrão pistonado existem poucos trabalhos para o duto anular, enquanto para escoamento estratificado ar-líquido existem estudos para tubos horizontais ao igual existem poucos para duto anular, baseados na técnica PIV. No presente trabalho analisamos escoamento laminar, turbulento, pistonado e estratificado para um grande duto anular, onde são analisadas as diferentes estatísticas acima expostas, ademais o PIV será sincronizado com outros sensores como AWMS e câmera de alta velocidade.

2.6. Sensor wire-mesh

O sensor wire-mesh (WMS) foi apresentado pela primeira vez por Johnson (1987) como um sensor para a medida da fração de água em óleo, com base na condutividade do fluido. Prasser et al. (1998) asseguraram a eliminação da interferência entre os eletrodos. A WMS foi desenvolvida para aplicação em plantas de energia nuclear, em que o escoamento de água e vapor é submetido a altas temperaturas e pressões. A partir daí a WMS está expandindo seu uso em diferentes áreas. Recentemente, Silva et al. (2007) desenvolveu uma WMS com base na permissividade do fluido, o que amplia a gama de substâncias que podem ser identificadas. Além disso, geometrias bastante diferenciadas do sensor WMS têm sido apresentadas para variadas aplicações (Damsohn and Prasser (2009a), Damsohn e Prasser (2009b), Belt et al. (2010), Höhne et al. (2006)), mas o princípio de funcionamento e os circuitos eletrônicos associados ainda são essencialmente os mesmos. Uma revisão abrangente da literatura foi realizada por Velasco e Rodriguez (2015), com implementações recentes e relevantes, notavelmente no escoamento de gás-líquido e líquido-líquido, comparando-a com outras técnicas. Além disso, é mostrado como o sensor pode ser adaptado a cada aplicação e suas diferentes geometrias, apontando a sua flexibilidade.

2.6.1. Princípio de operação do sensor WMS

A WMS consiste em dois ou três planos de fios. Os fios são paralelos em cada plano e em rotação de 90° entre os planos, Figura 2.6 a e b. A distância entre os planos é de alguns milímetros ou menos (0,35 a 3 mm), enquanto que a distância entre os fios de um plano é de (0,5 a 15 mm). Estes planos de fios são colocados na área de secção transversal do tubo ou duto anular. O espaço entre cada ponto de cruzamento é preenchido com fluido. Através de um processo de comutação, cada fio transmissor é ativado sequencialmente, ou seja, ele envia um sinal elétrico para o escoamento. Em seguida, o fio receptor recebe um sinal que contém a informação que identifica o tipo de fluido em cada ponto de cruzamento. Mais detalhes sobre os princípios de funcionamento da WMS condutivas e capacitivas podem ser encontrados em Damsohn e Prasser (2009a), Silva et al. (2007) e Velasco (2015). Quando a sequência de comutação para a totalidade do conjunto de transmissores é completada, uma tomografia com a informação do tipo de fluido ou fração de fase no plano de corte transversal está disponível, dentro de um intervalo de tempo. A união destas tomografias cria uma imagem 3D da topologia

do escoamento. Além disso, é possível determinar vários parâmetros importantes do escoamento a partir desta imagem.

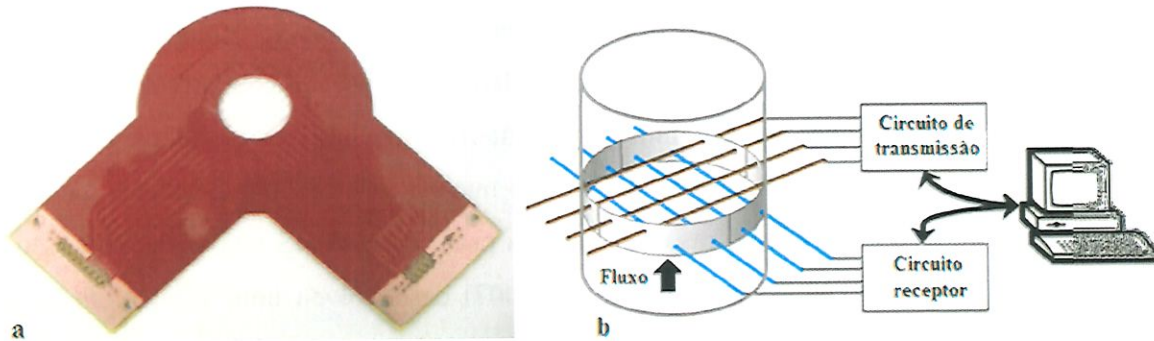


Figura 2.6. (a) Fotografia de um protótipo desenvolvido, (b) Representação esquemática do sensor wire-mesh, extraída. Velasco (2015).

A seguir se dará uma descrição da *wire-mesh* capacitiva desenvolvida por Silva et al. (2007) e Velasco (2015). Por ser uma sonda que mede a permissividade elétrica (ou capacitância) pode identificar entre óleo e ar. Esta característica não está presente na condutiva, já que esta não pode discriminar entre os valores resistivos do óleo e o ar, por serem os dois substâncias de baixa condutividade.

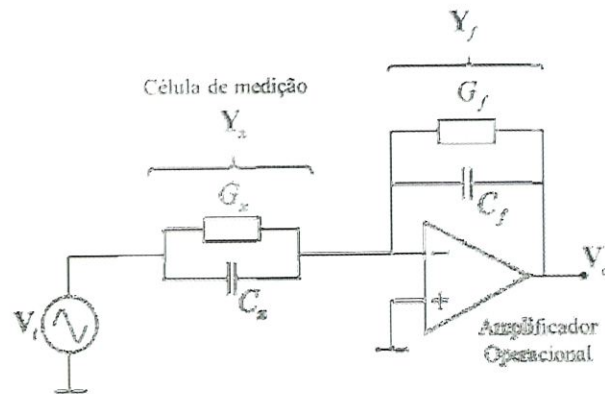


Figura 2.7. Circuito prático para a medição das impedâncias de um fluido. Tomado de, da Silva (2008).

Usando um amplificador retroalimentado se consegue medir a impedância ou admitância do fluido, Figura 2.7. Pode-se encontrar a admitância Y_x que é a admitância do fluido em cada ponto de cruzamento, se é conhecida a admitância de retroalimentação Y_f e o ganho de tensão A_v , do sinal de entrada V_i , que neste circuito estão relacionados por,

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{Y_x}{Y_f} \tag{2.9}$$

onde V_o é a voltagem de saída.

Fazendo da admitância de retroalimentação um resistor em paralelo com um capacitor, pode-se escrever esta equação como,

$$\frac{V_o}{V_i} = - \left(\frac{G_x + j\omega C_x}{G_f + j\omega C_f} \right) \quad (2.10)$$

onde $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência de excitação. Agora, tomando o módulo desta equação, temos,

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{\sqrt{G_x^2 + (2\pi f)^2 C_x^2}}{\sqrt{G_f^2 + (2\pi f)^2 C_f^2}} \quad (2.11)$$

Este circuito tem uma resposta em magnitude em função da frequência como a mostrada na Figura 2.8. Esta resposta mostra duas bandas de frequência onde o ganho é plano (constante) com valores dados pelas razões G_x/G_f e C_x/C_f para cada banda. Esses valores podem ser obtidos através da utilização do limite de f tendendo a zero e infinito, respectivamente, na equação (2.11). Na prática, o ganho, frequência e G_f e C_f são conhecidos. Assim, se podem obter os valores G_x e C_x do fluido e fazer a sua identificação. Mas no WMS capacitiva se usa somente uma frequência de excitação em 5 Mhz, com isto o circuito pode identificar só a parte capacitiva, de modo que o ganho pode ser aproximado como,

$$\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = \frac{C_x}{C_f} \quad (2.12)$$

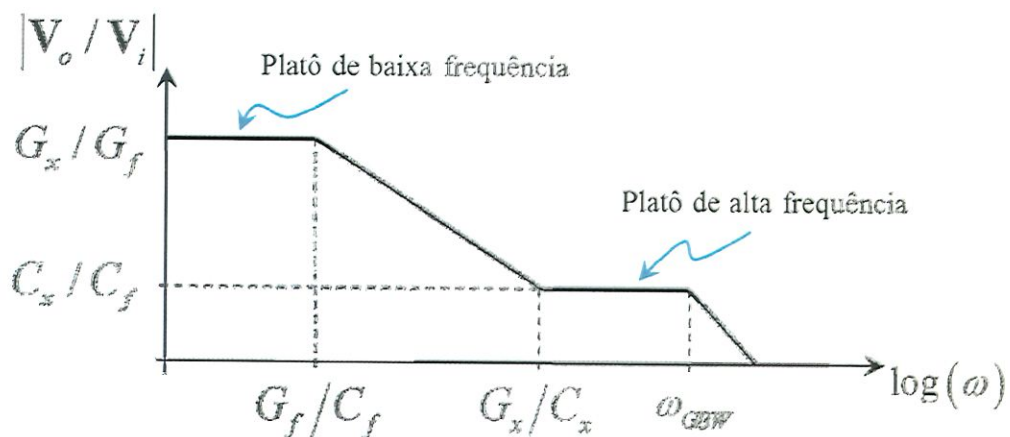


Figura 2.8. Resposta em frequência simplificada para o circuito de medição da admitância. Tomado de, da Silva (2008).

2.7. Instrumentação aplicada em duto anular

Quanto ao escoamento em duto anular, Kelessidis e Dukler (1989) e Kelessidis e Dukler (1990) usaram uma sonda de condutividade em um duto anular vertical concêntrico e excêntrico, com diâmetros internos e externos de 5,08 e 7,62 cm, respectivamente, parâmetros estatísticos, como função densidade de probabilidade (PDF) do sinal de tensão, foram obtidos e medições de velocidade foram realizadas. Os escoamentos estudados foram nos padrões bolhas, agitante, pistonado e bolhas de Taylor, concluindo que o efeito da excentricidade nas transições do padrão do escoamento, referente ao grau de excentricidade, tem um efeito menor sobre as transições.

A análise da PDF dos sinais foi realizada no escoamento ar-água em um duto anular concêntrico vertical, utilizando a técnica de sonda condutiva, identificando a distribuição das duas fases nos padrões de escoamento bolhas e agitante. Medidas de condutividade do escoamento foram analisadas em diferentes posições radiais para medir a distribuição do comprimento da corda da bolha, para cada condição de escoamento, Das et al. (1999), Das et al. (2000), Hernández et al. (2011) e Julia e Hibiki. (2011). Um resultado interessante é que a transição bolha-pistão é marcada por um aumento nos picos nos sinais da sonda e no pico de tensão máximo na curva de PDF, em vez da área entre os dois picos Das et al. (1999). Ozar et al. (2008) aplicou uma sonda condutiva de quatro pontos de medição em duto anular vertical em escoamento gás-líquido, onde analisaram-se os parâmetros locais, fração de vazio, concentração da área interfacial e a velocidade da interface da bolha. Mostrou-se que pequenas bolhas tendem a se mover para a parede e grandes bolhas para o centro.

Em Sun et al. (2004) e Julia et al. (2009) foram usados sensores de impedância para obter sinais e depois parâmetros estatísticos para estudar o desenvolvimento axial dos padrões de escoamento ar-água nos padrões bolhas dispersas, pistonado, agitante e anular ascendentes em um duto anular vertical. Foi obtido um bom acordo entre os dados e resultados fornecidos por rede neural e modelo analítico de Sun et al. (2004).

Escudier et al. (1995) analisaram as distribuições da velocidade axial média, as intensidades de turbulência axial e tangencial, juntamente com o fator de fricção versus o número de Reynolds em um duto anular concêntrico para escoamentos monofásicos laminar, transição e turbulento. Os dados são apresentados para três líquidos não newtonianos. Foi demonstrado que os dados do fator de fricção caíram significativamente abaixo do nível em um escoamento newtoniano, em contraste com o comportamento antecipado para um fluido “*Power*

law". Kelessidis et al. (2011) realizaram experimentos em dutos anulares concêntricos e excêntricos; os dados experimentais foram apresentados para o escoamento disperso de bentonita-água, modelado como escoamentos de Herschel-Bulkley; medindo queda de pressão em diferentes vazões volumétricas. Brighton and Jones (1964) mediram a velocidade média e a localização da velocidade máxima em escoamentos turbulentos. Observou-se que os fatores de fricção dependem apenas do número de Reynolds e são independentes da razão do raio e há uma região próxima do ponto de velocidade máxima onde o gradiente de velocidade varia linearmente com o raio.

Wongwises and Pipathattakul (2006) estudaram padrões de escoamento bifásico, tais como, pistonado, anular, anular/pistonado, bolhas e agitante; mediram a queda de pressão e fração de vazio em escoamento horizontal e inclinado em um duto anular. Uma câmera de alta velocidade foi usada para estudar o escoamento.

2.8. Escoamento pistonado

Em escoamento pistonado, segundo as células unitárias, à medida que evoluem ao longo do tubo, são avaliadas como idênticas e uma célula única que representa as seguintes (Wallis, 1969). Em escoamento gás- líquido Moissis and Griffith (1962), fizeram uma análise do comportamento do nariz e da cauda da bolha, concluindo que o comportamento do gás-líquido na célula unitária é diferente e depende de cada célula do escoamento devido a seu efeito complexo, o escoamento de líquido na cauda de uma bolha, por exemplo, pode afetar o movimento de outra bolha que está seguindo. Dukler and Hubbard (1975) analisaram a célula unitária de escoamento pistonado em uma tubulação horizontal, onde propuseram um novo modelo para a célula unitária para analisar seu comportamento. Nicholson et al. (1978) estudaram o modelo de Dukler e Hubbard propondo um novo modelo modificado do fenômeno da célula unitária. Baseado no modelo em tubo horizontal de célula unitária em escoamento pistonado de Dukler e Hubbard, Fernandes et al. (1983) recomendaram um modelo para escoamento pistonado em uma tubulação vertical. Kodal and Stanislav (1989) trabalharam em um modelo de célula unitária em escoamento pistonado baseado na modelagem de equações de balanceamento. O fenômeno da célula unitária em escoamento de tubulações horizontais, verticais e inclinados foi analisado por Taitel and Barnea (1990) onde propuseram novos modelos para o escoamento pistonado.

Rosa (2002), Rosa. (2004) e Zwanziger and Rosa (2006) analisaram o comportamento do escoamento pistonado onde a célula unitária é representada por um pistão junto à bolha, Figura 2.9. As células têm comportamentos em sua dinâmica que variam com o tempo, como por exemplo, o comprimento e a velocidade do pistão e a bolha, por conseguinte, é necessário modelar a célula com uma média desta, que representa a todas.

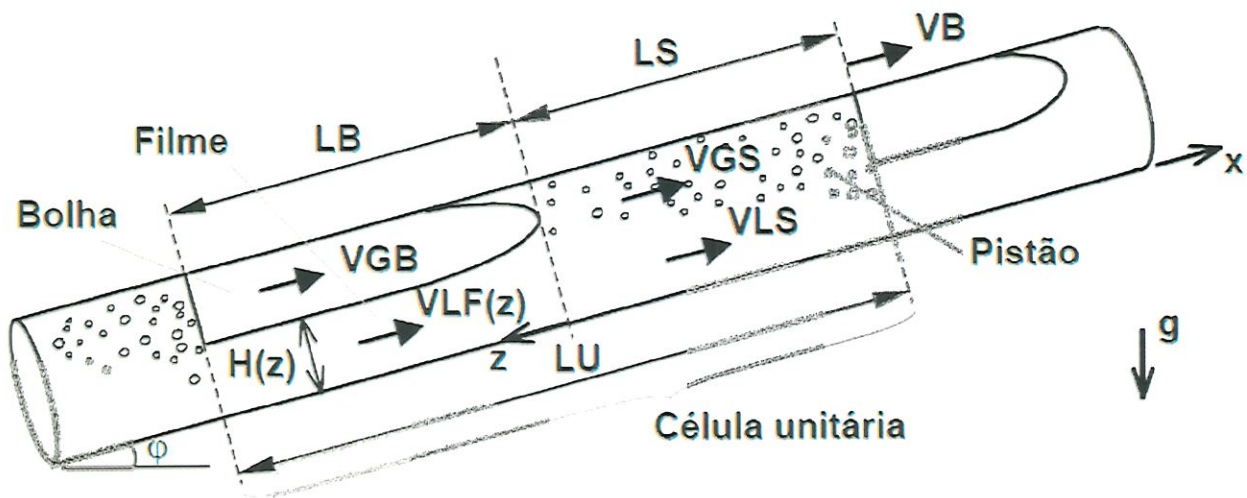


Figura 2.9. Representação esquemática da célula unitária Zwanziger e Rosa (2006)

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

Em seguida, descrevem-se marcos teóricos do projeto, baseados na instrumentação usada. Com o objetivo de esclarecer conceitos dos sistemas PIV, AWMS, câmera de alta velocidade e fenômenos da turbulência.

3.1. Contextualização do PIV

O sistema (PIV) consiste em um número de elementos óticos e eletrônicos sincronizados usados para caracterizar o fenômeno físico de um escoamento, tanto qualitativa quanto quantitativamente, a técnica é não invasiva facilitando a análise e processamento dos dados do escoamento (WESTERWEEL, 2008).

O PIV foi usado, para analisar e medir o campo de velocidades do escoamento na secção transversal de um tubo ou duto, que por meio de partículas que seguem o fluido é possível determinar o deslocamento destas e calcular a relação espaço e tempo determinando a velocidade do escoamento (KOMPENHANS e ERAFFEL et al., 2000).

A região onde se espera concretizar o escoamento é iluminada com o plano de laser e as imagens são gravadas por uma câmera PIV de alta resolução situada em posição ortogonal à secção de análise requerida. Para a análise do processamento, as imagens são divididas em janelas de interrogação e aplicam-se técnicas estatísticas de correlação cruzada determinando o campo de velocidades, Figura 3.1.

Para que o sistema PIV funcione corretamente necessita-se que partículas traçadoras próprias do fluido, ou adicionadas a este, sigam com precisão a trajetória do escoamento, por meio das imagens de partículas gravadas consecutivamente e o tempo entre gravação é possível calcular os deslocamentos e fazer a análise de velocidade.

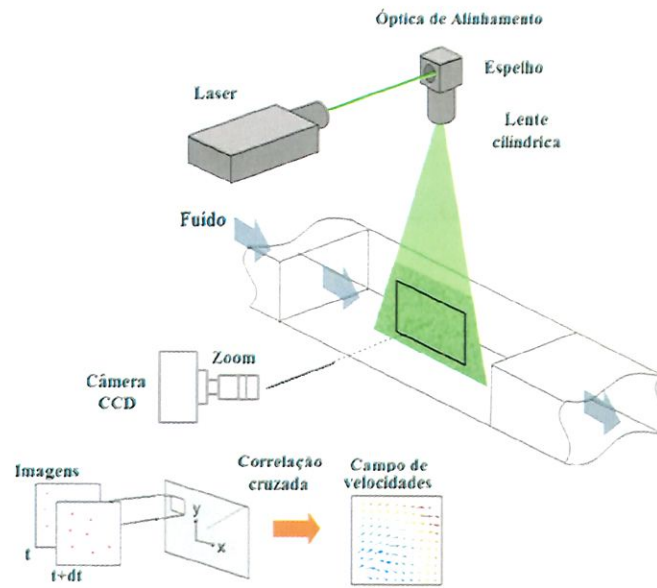


Figura 3.2. Esquema geral de funcionamento do sistema PIV, adaptada de <http://www.seika-di.com>.

3.1.2. Método da correlação cruzada de imagens

Quando as imagens são registradas pela câmera PIV, a análise de deslocamento das partículas é feita com correlação cruzada, Figura 3.3, este método é usado para definir o campo de velocidades das imagens consecutivas do escoamento registradas pela câmera do PIV, (ENGLART et al., 1989; WILLERT e GHARIB., 1991). Com as duas imagens, uma obtida no instante t (Imagem 1) e outra em $t + \Delta t$ (Imagem 2), a velocidade é escolhida na Imagem 1, e então a mesma configuração das partículas é buscada na imagem 2. A região base indicada por $I_1(j, k)$, na Figura 3.3, e a região busca indicada por $I_2(j, k)$ estão fixadas dentro de uma região $I_B(j, k)$, (AZEVEDO, 2002), (ALMEIDA, 1997). O modelo para a correlação cruzada normalizada das imagens PIV é determinada segundo, Englart et al. (1989),

$$R(m, n) = \frac{\sum_j \sum_k I_1(j, k) I_2(j - m, k - n)}{\{[\sum_j \sum_k I_1^2(j, k)][\sum_j \sum_k I_2^2(j - m, k - n)]\}^{1/2}} \quad (3.1)$$

onde $I_1(j, k)$ e $I_2(j, k)$ são duas sub-imagens dentro das imagens 1 e 2 e (j, k) são identificadores em uma base $J \times K$ pixels que está localizada dentro de uma região de busca com $M \times N$ pixels. Na imagem 1 com coordenadas do ponto central (x_1, y_1) e na imagem 2 também

com coordenadas do ponto central (x_1, y_1) , usando o método de correlação cruzada (equação 3.1, a imagem 1 é sobreposta nas aceitáveis posições dentro da imagem 2 e o ponto central de correlação R tem coordenadas (x_2, y_2) Figura 3.4. O vetor velocidade é a linha que junta o centro da região de busca ao centro da região base na posição onde acontece o maior valor do coeficiente de correlação R (AZEVEDO, 2002), (ALMEIDA, 1997).

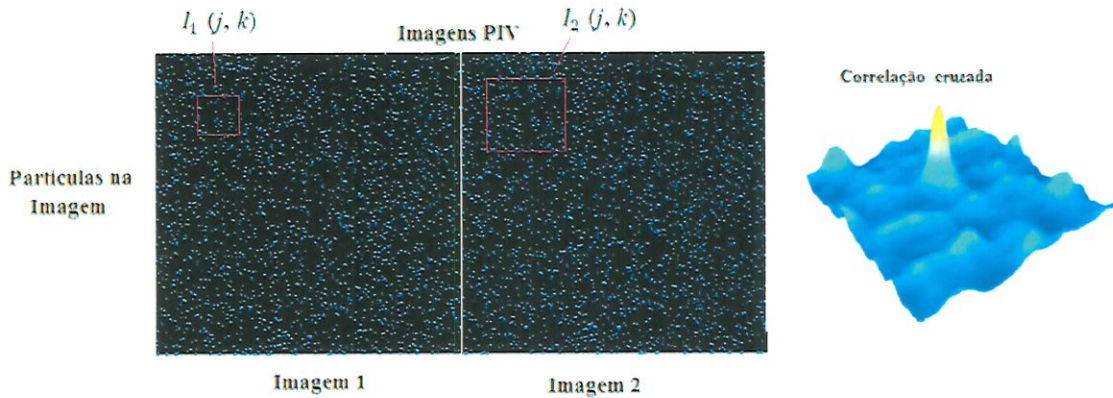


Figura 3.3. Correlação espacial cruzada entre janela de interrogação da primeira imagem com a janela correspondente na segunda imagem. Imagem 1 instante t , Imagem 2 instante $t + \Delta t$. adaptada de (AZEVEDO, 2002), (ALMEIDA, 1997).

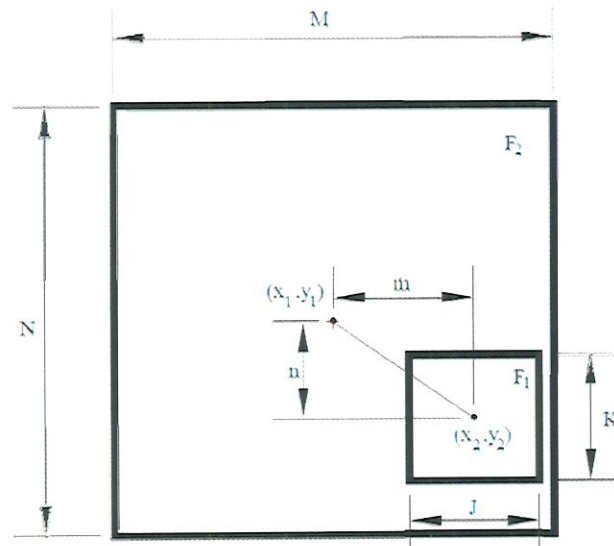


Figura 3.4. Região base na posição de maior correlação (ALMEIDA, 1997).

$$u = FS \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \quad (3.2)$$

$$v = FS \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \quad (3.3)$$

3.1.3. Autocorrelação (único quadro/exposição dupla) (single frame/double exposure)

A luz dispersa da primeira e segunda exposição das partículas é gravada em uma imagem. A imagem completa é subdividida nas chamadas janelas de interrogação e cada janela é avaliada por autocorrelação, (Figura 3.5).

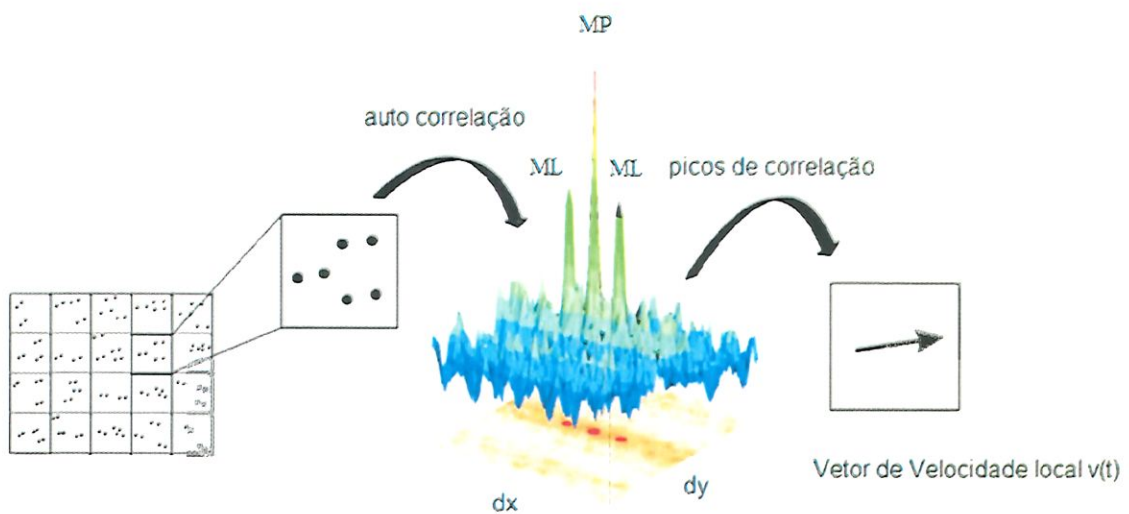


Figura 3.5. Avaliação das gravações PIV utilizando Auto correlação, adaptada de manual Flow Master, Lavision.

A função de autocorrelação é caracterizada por dois picos de correlação idênticos ML simétricos de rotação em relação ao pico central, MP, mais alto, indicando deslocamento zero (Figura 3.5). Esta é uma consequência, pois não se pode detectar o sinal do deslocamento porque não se sabe qual é a partícula que é iluminada pelo primeiro e segundo pulso laser. Portanto, a informação da autocorrelação é ambígua e não é conclusiva caso não se use algumas informações a priori sobre o escoamento observado. Além disso, a detecção de deslocamentos muito pequenos é um problema, pois, neste caso, os picos de correlação estão muito próximos do pico central. Em comparação com a correlação cruzada, os picos de auto correlação são significativamente menores. O Alto ruído aumenta a possibilidade que o pico de correlação no deslocamento desapareça em segundo plano.

A técnica de auto correlação de imagens é usado em sistemas PIV para imagens de dupla exposição em uma só imagem, em modo de duplo pulso/quadro único. Para a análise dos coeficiente de correlação é apresentado pela equação (3.1) em termos de, $I_1(j, k) = I_2(j, k)$ e definida, (AZEVEDO, 2002), (ALMEIDA, 1997),

$$R(m, n) = \frac{\sum_j \sum_k I_1(j, k) I_1(j-m, k-n)}{\{[\sum_j \sum_k I_1^2(j, k)][\sum_j \sum_k I_1^2(j-m, k-n)]\}^{1/2}} \quad (3.4)$$

onde m muda de $-j$ a j e n varia de $-k$ a k .

O máximo central (MP) é $(x_1 = 0, y_1 = 0)$, e os máximos locais (ML) são (x_2, y_2) , a velocidade é medida por:

$$u = FS \frac{|x_2 - x_1|}{\Delta t} \quad (3.5)$$

$$v = FS \frac{|y_2 - y_1|}{\Delta t} \quad (3.6)$$

FS é um fator que relaciona o tamanho na imagem com o tamanho no escoamento (AZEVEDO, 2002), (ALMEIDA, 1997).

3.1.4. Correlação cruzada (duplo quadro/exposição dupla) (double frame/ double exposure)

A luz dispersa da primeira e segunda exposição das partículas é gravada em duas imagens diferentes. A imagem completa é subdividida em janelas de interrogação e cada janela é avaliada por correlação cruzada. Para a correlação cruzada, uma câmera CCD de duplo fechamento normalmente é usada para gravar imagens com “duplo quadro / exposição dupla”.

O tempo mínimo de atraso entre os dois pulsos do laser é limitado pelo tempo necessário para a transferência de quadros da câmera. Como o segundo quadro não pode ser fechado, as duas imagens têm diferentes intensidades de fundo e precisa usar um filtro adequado na frente da lente da câmera. Mas, em comparação com a auto correlação, obtém-se um pico de correlação maior e inequívoco, Figura 3.6.

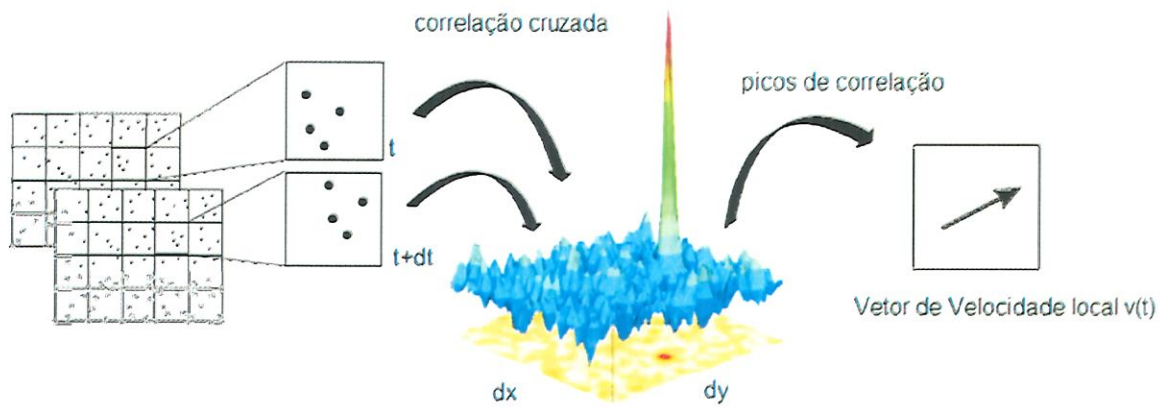


Figura 3.6. Avaliação das gravações PIV utilizando correlação cruzada, adaptada do manual Flow Master, Lavision.

3.2. Operações de filtragem nas imagens PIV

As operações de filtro desempenham um papel importante no processamento de imagens PIV. Eles são usados para suavização, detecção de bordas, aprimoramento de textura ou contraste e muitas outras tarefas especiais. Há um número de filtros, especialmente os filtros- $N \times N$, que operam somente na vizinhança próxima de um pixel. Por outro lado, as operações de filtro realizadas usando a transformada de Fourier que operam em frequências, ou seja, estruturas como bordas agudas são analisados no âmbito de sua representação em frequência.

3.2.1. Filtros de vizinhança linear e não linear

Entre eles, os mais utilizados são os que calculam o novo valor de um pixel a partir de uma combinação linear dos oito pixels circundantes. Matematicamente, isso pode ser representado como uma matriz 3×3 , que é aplicado sobre a imagem para calcular um novo pixel central cada vez que é usado a uma área 3×3 :

$$f'_{i,j} \left(\begin{array}{ccc} a_1 f_{i-1,j-1} & a_2 f_{i-1,j-1} & a_3 f_{i-1,j-1} \\ b_1 f_{i-1,j} & b_2 f_{i-1,j} & b_3 f_{i-1,j} \\ c_1 f_{i-1,j+1} & c_2 f_{i-1,j+1} & c_3 f_{i-1,j+1} \end{array} \right) / \text{divisor} \quad (3.7)$$

onde

$$\begin{pmatrix} a1 & a2 & a3 \\ b1 & b2 & b3 \\ c1 & c2 & c3 \end{pmatrix} / \text{divisor}$$

o "divisor" é o fator de divisão final da soma. Se todos os elementos do filtro forem 1 (= Suavização), então 'divisor' é definido como 9 para não alterar a intensidade da imagem.

3.2.2. Filtro de suavização

Os filtros de suavização são usados para eliminar o ruído de alta frequência sobre a vizinhança de um pixel. O filtro de Suavização 3x3, este é o filtro de suavização mais simples e funciona bem, suaviza as arestas afiadas, por exemplo,

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} / 9$$

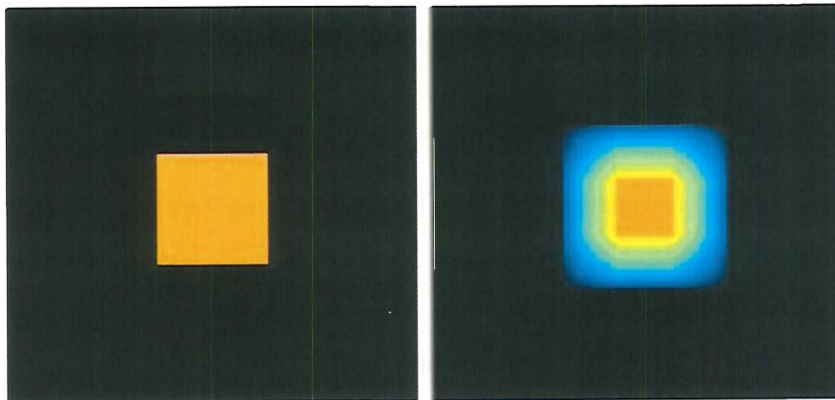


Figura 3.7. Imagem original (esquerda) e imagem suavizada 9x9 (direita), adaptada do manual Flow Master, Lavigation.

3.2.3. Transformada de Fourier para o processamento de imagens no domínio da frequência

No processamento de imagens digitais 2D do PIV no domínio da frequência, a transformada de Fourier é a técnica principal que permite trabalhar no domínio espacial (u) e mudar para o de frequência (x), e reciprocamente (OLIVEIRA et al., 2008). Para a análise de imagem se precisa trabalhar por meio da forma discreta da transformada de Fourier (DFT- *Discrete Fourier Transform*) definida como,

$$F(u) = \sum_{x=0}^{N-1} f(x) W_N^{xu} \quad (3.8)$$

onde $W_N = e^{-j2\pi/N}$, para $u = 0, 1, \dots, N - 1$. A inversa fica,

$$F(x) = \frac{1}{N} \sum_{p=0}^{N-1} f(p) W_N^{xp} \quad (3.9)$$

onde $W_N = e^{j2\pi/N}$, para $u = 0, 1, \dots, N - 1$

No domínio de frequências é definido por Euler,

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta \quad (3.10)$$

Usando esta expressão e a equação 3.8, usando igualmente a similitude das funções seno e cosseno, define-se a DFT de uma função $f(x, y)$ de dimensão $M \times N$ como,

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{N-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x, y) \left[\cos\left(\frac{2\pi ux}{N} + \frac{2\pi uy}{M}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi ux}{N} + \frac{2\pi uy}{M}\right) \right] \quad (3.11)$$

onde $u = 0, 1, \dots, N - 1$ e $v = 0, 1, \dots, M - 1$.

De tal modo, o valor de $F(u, v)$ para cada valor de (u, v) , é composto pela soma de todos os valores da função $f(x, y)$ multiplicados por senos e cossenos a diferentes frequências. Onde a frequência está relacionada com a taxa de mudança, pode-se relacionar as frequências na transformada de Fourier (u, v) com padrões de mudanças de intensidade em uma imagem $f(x, y)$, (OLIVEIRA et al., 2008). Para analisar a imagem com detalhes dos padrões ela é exposta no seu espectro de Fourier (GONZALEZ; WOODS, 2002), definida por,

$$|F(u, v)| = \sqrt{R^2(u, v) + I^2(u, v)} \quad (3.12)$$

onde $R(v, u)$ e $I(v, u)$ representam a parte real e imaginária de $F(u, v)$, respectivamente.

3.3. Laser Nd-YAG

Para a análise dos perfis de velocidade em sistemas PIV, é necessário se precisa iluminar uma região de interesse por médio de um Laser Nd-YAG. O Nd: Lasers YAG na maioria das vezes emitem luz com um comprimento de onda de 1064 nm, no infravermelho (YARIV, 1989). Os pulsos Nd: YAG são normalmente atuados em modo interrompido e sincronizado com a câmera, donde um interruptor óptico é plantado na cavidade do laser (YARIV, 1989).

É importante a geração de um plano de laser em forma de folha com uma espessura determinada, para iluminar só uma área de visualização de partículas para ser gravada pela câmera PIV, (MUÑOZ, 2008). Isto para evitar que as partículas que se movem entre planos paralelos ou perpendiculares ao plano em estudo sejam também iluminadas gerando confusão no processamento dos dados (Figura 3.8).

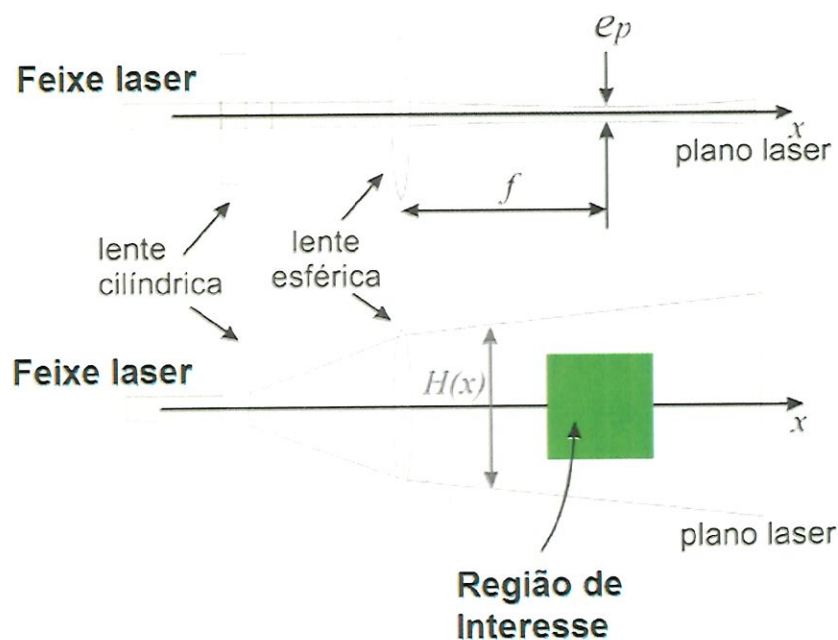


Figura 3.8. Geração do feixe de laser plano com espessura desprezível *Fonte: adaptada de (MUÑOZ, 2008).*

3.4. Partículas traçadoras

Um aspecto importante em termos do fluido estudado são os marcadores, partículas que são adicionadas ao fluido, sendo isso o que permite observar e descrever o seu comportamento

dinâmico. Portanto, de acordo com a Lei de Stokes, verifica-se se o tamanho da partícula é adequado para calcular a força de cisalhamento experimentada por objetos esféricos que se movem no seio de um fluido viscoso.

As partículas de traçador utilizadas, que são incluídas com o PIV, são esferas ocas de vidro. Entre as propriedades, especifica-se que o diâmetro médio destas é $10 \text{ } \mu\text{m}$. Assim, aplicando a equação referenciada para o tempo de relaxamento, com propriedades de fluido a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$,

$$d_p = 10 \mu\text{m} = 10 \times 10^{-6} \text{ m}; \quad \rho_p = 1100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \quad \rho = 998,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \quad (3.13)$$

$$\mu = 1,102 \times 10^{-3} \text{ N s/m}^2$$

$$\tau_s = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\nu \rho} = 6,1 \times 10^{-6} \text{ s} \quad (3.14)$$

onde τ_s é o tempo de relaxamento, d_p é o diâmetro de Stokes da partícula, μ é a viscosidade do fluido

Como pode ser visto, este valor é quase insignificante, de modo que as partículas devem seguir de perto o escoamento do fluido, para qualquer faixa de velocidade. Outra demonstração pode ser feita com taxa de sedimentação, tendo,

$$v_s = d_p^2 \frac{(\rho_p - \rho)}{18\mu} g = 5,03 \times 10^{-6} \text{ m/s} \quad (3.15)$$

onde v_s é a velocidade de sedimentação das partículas (velocidade limite), g é a aceleração da gravidade, ρ_p é a densidade das partículas e ρ é a densidade do fluido.

Este também é um valor muito pequeno, menor que os valores de velocidade estudados, e pode ser negligenciado, presume-se que as partículas seguem fielmente o comportamento de escoamento.

3.5. Sistema WMS

3.5.1. Permissividade relativa complexa

A permissividade é a habilidade de um material para transmitir ou aceitar um campo elétrico. A permissividade relativa complexa ϵ_{rp} é uma propriedade habitualmente utilizada para caracterizar materiais, (VELASCO, 2015).

$$\epsilon_{rp} = \epsilon^r - j\epsilon^{rc} \quad (3.16)$$

onde a parte real ϵ_{rp} é chamada permissividade relativa e a parte imaginária $j\epsilon^{rc}$ é chamado de fator de perda.

A equação de Cole-Cole ampliada, (BONDET et al., 2008), apresenta matematicamente o desempenho da permissividade complexa para frequências até os PHz (10^{15} Hz ou Peta Hertz).

$$\epsilon_{rp} = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 - (j\omega\tau)^{1-\beta}} - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (3.17)$$

onde ϵ_s é o valor da permissividade relativa para baixas frequências ou estática, σ é a condutividade estática, ϵ_{∞} é o valor da permissividade para frequências óticas, τ é o tempo de relaxamento, β é chamado de parâmetro de distribuição, ϵ_0 é a permissividade do vácuo, $\epsilon_0=8,85$ pF/m e $\omega=2\pi f$ é a frequência angular. O relaxamento é um processo no qual ϵ^r decresce com o incremento da frequência. Esta equação descreve uma grande quantidade de materiais como gases, líquidos e sólidos, sejam condutores ou isolantes, (VELASCO, 2015).

Para frequências menores a poucas dezenas de MHz, o processo de relaxamento não é observado, $\tau = 0$. Então, a equação de Cole-Cole pode ser simplificada,

$$\epsilon_{rp} = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0} \quad (3.18)$$

Onde ϵ será usada para representar a permissividade relativa estática, também chamada constante dielétrica.

3.5.2. Medição teórica da permissividade complexa

Para achar a permissividade complexa pode ser empregado um circuito fundamental como o exibido na Figura 3.9, conhecido como célula de medição. Nesse dispositivo, a admitância da célula é dada por,

$$Y = j\omega k_g \varepsilon_0 \varepsilon_{rp} \quad (3.19)$$

onde k_g é uma constante que está relacionada com a geometria da célula. Para a célula de medição da Figura 3.9, que é um capacitor de placas paralelas, k_g é dada por,

$$k_g = \frac{l^2}{d} = \frac{A}{d} \quad (3.20)$$

Portanto, a admitância de um fluido numa célula está descrita, a partir das equações (3.18) e (3.19) como,

$$Y = j\omega k_g \varepsilon_0 \left(\varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) = k_g \sigma + j\omega k_g \varepsilon_0 \varepsilon \quad (3.21)$$

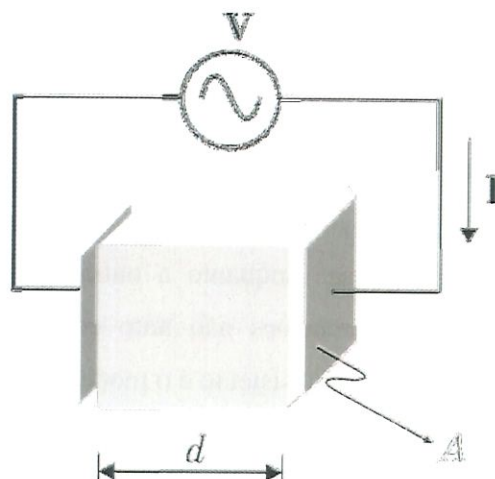


Figura 3.9. Exemplo de uma célula de medição. Tomado de (DA SILVA, 2008).



Esta equação tem a mesma forma da admitância para um circuito composto de um resistor e um capacitor em paralelo. O resistor será identificado através da sua condutância G e o capacitor pela sua capacitância C , assim.

$$Y = G + j\omega C \quad (3.22)$$

Assim, podemos modelar a admitância de um fluido, identificando a condutância e a capacitância da seguinte forma,

$$G = k_g \sigma \quad (3.23)$$

$$C = k_g \varepsilon_0 \varepsilon \quad (3.24)$$

Pode-se ver na equação (3.22) que a admitância (ou a impedância) em baixas frequências está dominada pela condutividade estática ou resistência do fluido; enquanto, para frequências maiores, está dominada permissividade estática, (VELASCO, 2015).

3.5.3. Modelos de relação para o sensor WMS em escoamentos bifásicos

Em misturas bifásicas gás-líquido existem trabalhos que avaliam a permissividade das misturas de fluidos. Jaworek e Krupa, (2010) e Sihvola (1999) apresentam diferentes modelos da literatura. Cada modelo foi desenvolvido para um padrão de escoamento específico e um único tipo de sensor. Alguns trabalhos consideram que a permissividade complexa é dominada pela sua parte real para materiais isolantes. Outros autores consideram que os modelos são válidos para materiais condutores (ou seja, com perda), Sihvola (1999). No caso da relação de Maxwell-Garnett os modelos têm sido especialmente desenvolvidos para materiais com perdas, com certas exceções. As relações chamadas de não auto consistentes são as que fazem diferença entre a fase contínua e a fase dispersa. Enquanto a outra que não faz essa distinção, são chamadas de auto consistentes. Nas relações não auto consistentes, um exemplo típico é Maxwell-Garnett, e um exemplo de auto consistente é o modelo Paralelo, (VELASCO, 2015).

Para escoamentos bifásicos gás-líquido não é necessário obter as duas propriedades, condutividade e a permissividade, basta apenas uma delas. Habitualmente, prefere-se medir a permissividade. Desde modo, na Tabela 3.1, mostrar-se a fração da fase dispersa α_2 como uma função da permissividade de uma mistura ε_x e as constantes ε_2 e ε_1 , que são as permissividades

relativas dos fluidos que a compõem: ε_2 corresponde ao fluido da fase dispersa, e ε_1 , ao fluido da fase contínua (VELASCO, 2015).

Tabela 3.1. Modelos de relação entre a fração da fase dispersa e a permissividade de uma mistura bifásica tomada de (VELASCO, 2015).

Modelo	Características	Equação
Bruggeman 1	Vazios cilíndricos (padrão anular)	$\alpha_2 = \frac{(\varepsilon_x + \varepsilon_2)(\varepsilon_x - \varepsilon_1)}{2\varepsilon_x(\varepsilon_2 - \varepsilon_x)}$
Bruggeman 2	Vazios esféricos (padrão bolhas)	$\alpha_2 = \frac{(2\varepsilon_x + \varepsilon_2)(\varepsilon_x - \varepsilon_1)}{3\varepsilon_x(\varepsilon_2 - \varepsilon_x)}$
Bruggeman 3	Vazios sem ordem (padrão agitado)	$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_2(\varepsilon_x^2 - \varepsilon_1^2)}{(\varepsilon_x^2 - \varepsilon_1\varepsilon_2)(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)}$
Bruggeman-Maxwell-Wagner	Escoamento disperso água em óleo	$\alpha_2 = \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}\right) \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_x}\right)^{1/3}$
Séries	Placas paralelas, escoamento estratificado	$\alpha_2 = \left(\frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_x}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}\right) \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_x}\right)$
Paralelo	Placas paralelas, escoamento pistonado	$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_x}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}$
Maxwell-Garnett	Suspensão de partículas de σ_L baixa, com $\sigma_L < \sigma_H$ e $\varepsilon_L \ll \varepsilon_H$ (padrão disperso óleo em água)	$\alpha_2 = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_x)(2\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)(2\varepsilon_1 + \varepsilon_x)}$ *
Hannai		$\alpha_2 = 1 - \left(\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_x}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}\right) \left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_x}\right)^{1/3}$ *
Lei de potência		$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_x^\beta - \varepsilon_1^\beta}{\varepsilon_2^\beta - \varepsilon_1^\beta}$, para $0 \leq \beta \leq 1$
Looyenga		$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_x^{1/3} - \varepsilon_1^{1/3}}{\varepsilon_2^{1/3} - \varepsilon_1^{1/3}}$
Birchak		$\alpha_2 = \frac{\varepsilon_x^{1/2} - \varepsilon_1^{1/2}}{\varepsilon_2^{1/2} - \varepsilon_1^{1/2}}$
Logarítmico		$\alpha_2 = \frac{\ln \varepsilon_x - \ln \varepsilon_1}{\ln \varepsilon_2 - \ln \varepsilon_1}$

* Relação não-autoconsistente

Há relações que são casos particulares de outras relações. Por exemplo, Birchak e Looyenga são casos particulares da família de Lei de potência. Outras relações podem ser também mais complexas do que aquelas aqui expostas. Esse é o caso da equação de Maxwell-

Garnett, que pode levar em consideração a polaridade que apresentam as partículas dispersas e sua geometria; assim a equação proporcionada corresponde à fórmula clássica, onde a fase dispersa são gotículas perfeitamente esféricas. Os modelos Paralelos e Séries são chamados de limites de Wiener, porque estabelecem os valores máximos e mínimos que podem assumir uma mistura (VELASCO, 2015).

3.6. Análise de escoamento turbulento em duto anular

O estudo do escoamento turbulento totalmente desenvolvido em dutos anulares abarca informações a respeito de fatores de fricção, distribuições de velocidade e estrutura da turbulência. Igualmente, uma hipótese do escoamento turbulento em dutos anulares seria indispensável. Essa teoria está disponível para casos em que o escoamento totalmente desenvolvido acontece em tubos circulares e placas paralelas Brighton e Jones (1964).

O estudo do escoamento em dutos anulares é atraente não só por causa de suas aplicações diretas de engenharia, mas também porque é um problema insuficientemente analisado e há lacunas no estado da arte, como, por exemplo, o estudo do fenômeno da turbulência em escoamentos cisalhantes totalmente desenvolvidos.

Uma aberta revisão da literatura foi feita por Rothfua (1948), analisando os fatores de atrito para o escoamento em um duto anular. Foram medidas, além dos fatores de atrito, as distribuições de velocidade para o escoamento de ar com números de Reynolds referentes à transição e turbulência de baixa intensidade. Mais tarde, medições do fator de atrito estiveram apresentadas por Wulker e Whun, (1957) e Bird (1958). Katz (1950) mediu as distribuições de velocidade para o escoamento de água em duto anular para números de Reynolds de 9000, 36000 e 70000.

3.6.1. Análise da tensão de cisalhamento de Reynolds em duto anular

O caso que está sendo considerado aqui é o escoamento axissimétrico totalmente desenvolvido, Figura 3.10, no modelo apresentado a continuação foi desenvolvido para duto anular por Brighton e Jones (1964),

$$V = W = 0 \quad (3.25)$$

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0, \text{ todas as quantidades médias.} \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = 0, \text{ todas as quantidades m\u00e9dias, exceto a press\u00e3o.} \quad (3.27)$$

Onde V velocidade m\u00e9dia no tempo na dire\u00e7\u00e3o r , W velocidade m\u00e9dia no tempo na dire\u00e7\u00e3o φ azimutal.

As equa\u00e7\u00f5es de movimento para um escoamento incompress\u00edvel nas condi\u00e7\u00f5es anteriores s\u00e3o as seguintes:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \overline{uv}) + \frac{\nu}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU}{dr} \right) \quad (3.28)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (r \overline{v^2}) + \frac{\overline{w^2}}{r} \quad (3.29)$$

$$0 = -\frac{d}{dr} (\overline{vW}) - \frac{2\overline{vw}}{r} \quad \text{Laufer (1954)} \quad (3.30)$$

onde U \u00e9 velocidade m\u00e9dia no tempo na dire\u00e7\u00e3o x ; u , v e w s\u00e3o as velocidades instant\u00e2neas na dire\u00e7\u00e3o x , r e φ respectivamente e ν \u00e9 a viscosidade cinem\u00e1tica.

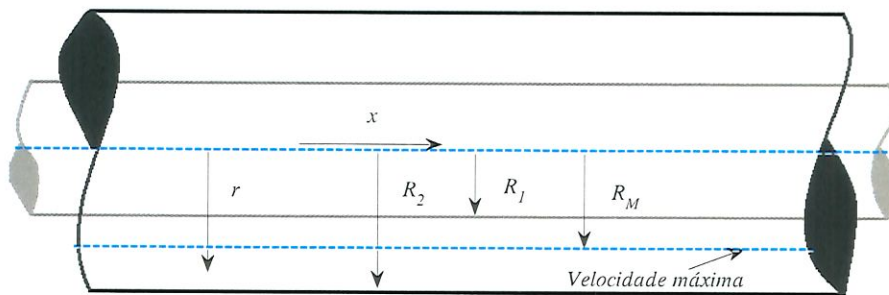


Figura 3.10. Diagrama esquem\u00e1tico do duto anular.

Laufer (1954) observou que ao integrar a equa\u00e7\u00e3o (3.30) e aplicando a condi\u00e7\u00e3o de camada limite $\overline{vW} = 0$ em $r = R$ \u00e9 visto que $\overline{vW} = 0$ para todos os r . A solu\u00e7\u00e3o para o escoamento laminar \u00e9 bem conhecida. \u00c9 facilmente obtida deixando as velocidades de flutua\u00e7\u00e3o serem iguais a zero e integrando diretamente. As equa\u00e7\u00f5es de escoamento turbulento n\u00e3o podem ser resolvidas analiticamente. No entanto, ao integrar a equa\u00e7\u00e3o (3.28) em rela\u00e7\u00e3o a r e aplicando as condi\u00e7\u00f5es de contorno $dU/dr = 0$ e $\overline{uv} = \mathcal{E}$ em $r = R_M$ \u00e9 obtida a seguinte express\u00e3o:

$$\overline{uv} = -\frac{1}{2\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{(r^2 - R_M^2)}{r} + v \frac{dU}{dr} + \frac{R_M}{r} \mathcal{E} \quad (3.31)$$

onde \mathcal{E} é o valor máximo do \overline{uv} (tensão de cisalhamento) no ponto máximo da velocidade,

A equação (3.31) não fornece a solução completa para a distribuição da tensão de cisalhamento de Reynolds, uma vez que desconhece dU/dr e, em geral, a localização da velocidade máxima e o valor da tensão de cisalhamento de Reynolds no ponto de velocidade máxima podem depender do número de Reynolds e razão de raio; isto é, em geral:

$$R_M = R_M(N_R, \alpha) \quad (3.32)$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}(N_R, \alpha) \quad (3.33)$$

onde N_R é o número de Reynolds, R_M é o raio do ponto máximo da velocidade e α é relação do raio do tubo interno ao raio do tubo externo $\frac{R_1}{R_2}$.

Rothfua (1948) e Katz (1950) concluíram que a localização da velocidade máxima para o escoamento turbulento era "essencialmente" o mesmo que para o escoamento laminar. Se isso fosse verdade, então R_M seria uma função da razão do raio, α , somente e seria independente da N_R .

Se for assumido para o presente que $\mathcal{E} = 0$ e, além disso, $v \frac{dU}{dr} \ll \overline{uv}$, então a equação (3.31) é simplificada para:

$$\overline{uv} = -\frac{1}{2\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \frac{(r^2 - R_M^2)}{r} \quad (3.34)$$

A equação (3.34), foi desenvolvida para calcular a tensão de cisalhamento de Reynolds em duto anular.

3.7. Escoamento turbulento em uma tubulação

O estudo do escoamento turbulento completamente desenvolvido em tubo é útil para analisar as características de turbulência de modo geral, para utilizar, no capítulo 5, os conceitos

na análise das tensões de cisalhamento e leis de parede em um duto anular. Em um escoamento turbulento em tubo, as três componentes de velocidade são diferentes de zero, Figura 3.11.

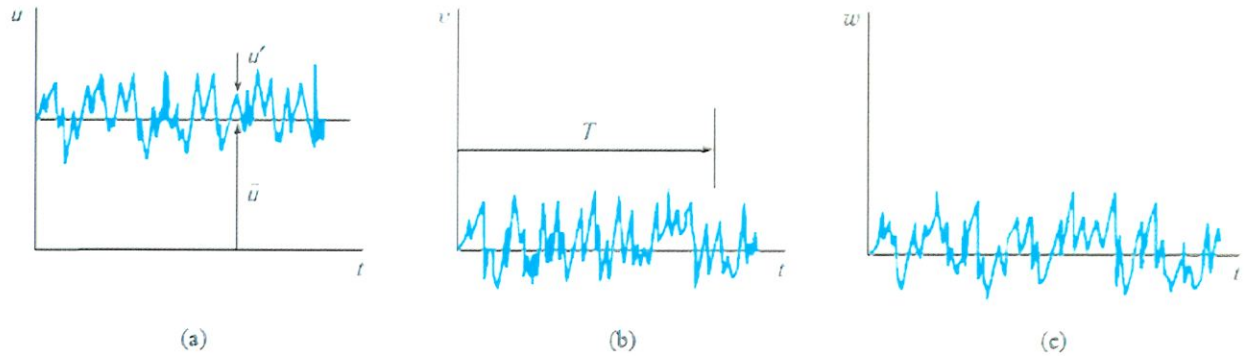


Figura 3.11. Componentes de velocidade em um escoamento turbulento em tubo: (a) componente axial x da velocidade; (b) componente radial r da velocidade; (c) componente azimutal θ da velocidade (POTTER, 2012).

As componentes de velocidade (u, v, w) estão escritas como,

$$u_i(x_i, t) = \bar{u}_i(x_i) + u'_i(x_i) \quad v_i(x_i, t) = \bar{v}_i(x_i) + v'_i(x_i)$$

$$w_i(x_i, t) = \bar{w}_i(x_i) + w'_i(x_i)$$

(3.35)

Usando a componente $\bar{u}_i(x_i)$ como exemplo, a média temporal é definida como,

$$\bar{u}_i(x_i) = \frac{1}{T} \int_0^T u_i(x_i, t) dt$$

(3.36)

Onde T é um incremento de tempo grande o suficiente para eliminar toda dependência de tempo de $\bar{u}_i(x_i)$. Em um escoamento desenvolvido em tubo, $\bar{u}_i(x_i)$ seria diferente de zero e $\bar{v}_i(x_i) = \bar{w}_i(x_i) = 0$, como é observado na Figura 3.11.

3.7.1. Tensão de cisalhamento de Reynolds

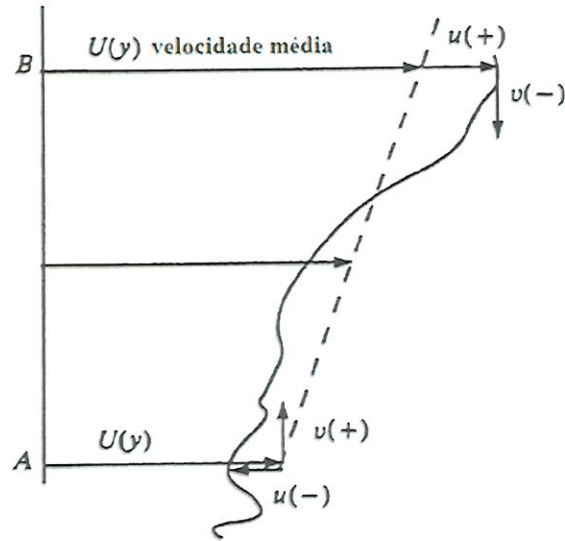


Figura 3.12. Perfil de velocidade média e flutuações para tensões de Reynolds (PANTON, 2013).

Existem componentes normais, $-\rho \langle uu \rangle$ e tangenciais, $-\rho \langle uv \rangle$, para as tensões de Reynolds. Os componentes tangenciais são de maior interesse, pois desempenham um papel maior na determinação do perfil médio da velocidade (PANTON, 2013).

Considere uma porção local de um escoamento simples $U(y)$ com um cisalhamento médio $\frac{dU}{dy}$. A tensão principal de Reynolds causada por um redemoinho turbulento com tamanho transversal ℓ e uma intensidade caracterizada pela escala de velocidade u_0 . Na Figura 3.12, assumamos que o fluido se origina perto do ponto A e é levado em direção ao ponto B, onde ele interage e se funde com o escoamento local. Da mesma forma, o fluido que se origina em B pode ser levado ao ponto A. Vamos supor que as tensões de Reynolds seja uma função da densidade, do tamanho e da força do redemoinho e da média de cisalhamento:

$$-\rho \langle uv \rangle = f(\rho, \ell, u_0, dU/dy) \quad (3.37)$$

Analisando dimensionalmente temos,

$$\frac{-\rho \langle uv \rangle}{u_0^2} = f\left(\frac{\ell}{u_0} dU/dy\right) \quad (3.38)$$

Assumindo uma relação linear entre as variáveis e introduzindo a difusividade turbulenta v_t de Boussinesq (1877), chegamos a,

$$-\rho \langle uv \rangle = v_t \frac{dU}{dy} \quad (3.39)$$

3.7.2. Análise de Turbulência

Suponha que o fluxo do canal seja impulsionado por um gradiente de pressão e esteja totalmente desenvolvido de modo que a velocidade e a tensão de Reynolds sejam independentes da coordenada da direção do fluxo x (Figura 3.13). A coordenada transversal y é medida a partir da parede inferior e meia altura h é a linha central onde a velocidade é U_0 . As mesmas equações se aplicam para um fluxo de tubo onde h é substituído pelo raio de tubo R . Consideramos a situação em que o número de Reynolds $Re = U_0 h / \nu \rightarrow \infty$.

Segundo os fluxos incompressíveis nos diz que o perfil de velocidade média é de a forma,

$$U = U \left(y; \nu, h, \frac{1}{\rho} \frac{dP_0}{dx} \right) \quad (3.40)$$

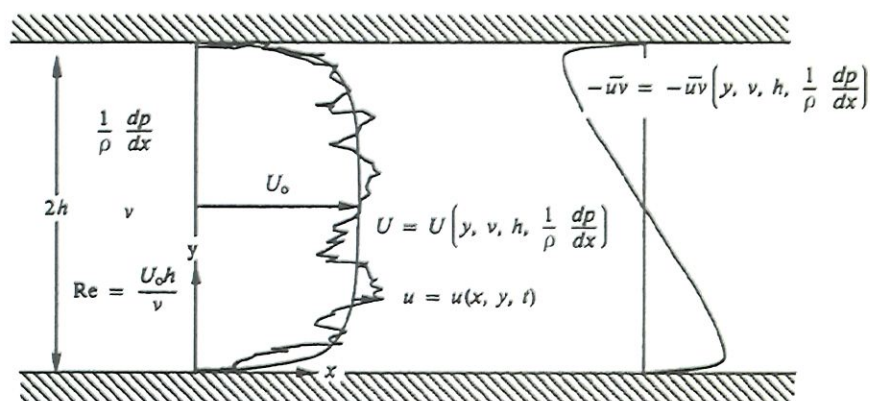


Figura 3.13. Distribuições de a tensão de cisalhamento em um escoamento desenvolvido (PANTON, 2013).

Como ρ e o gradiente de pressão na parede, dP_0 / dx , são as únicas variáveis com a dimensão da massa, eles devem ocorrer juntos. É inconveniente manter a pressão gradiente como uma variável. A velocidade da linha central é encontrada em $y = h$.

$$U = U\left(y = h; v, h \frac{1}{\rho} \frac{dP_0}{dx}\right) \quad (3.41)$$

Como U_0 sempre aumenta monotonicamente com $(1 / \rho) (dP_0 / dx)$, podemos usar U_0 como um parâmetro em vez do gradiente de pressão.

$$U = U(y; v, h, U_0) \quad (3.42)$$

O parâmetro U_0 nem sempre é a escala de velocidade adequada para formar uma variável não dimensional. Uma escala de velocidade adequada gera uma variável de primeira ordem à medida que o número de Reynolds se torna grande. Uma segunda escala de velocidade, é a velocidade de atrito u_τ , apresentada abaixo.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3.43)$$

A equação 3.43 pode ser avaliada na linha central, onde todas as tensões são zero, para relacionar a tensão de cisalhamento da parede τ_0 e o gradiente de pressão,

$$-h \frac{dP_0}{dx} = \tau_0 \quad (3.44)$$

Em um problema de perturbação singular, a escala de comprimento da camada interna é geralmente determinada olhando como as equações podem ser não dimensionalizadas para incluir os termos perdidos na camada externa, neste caso os termos viscosos. No entanto, para camadas de parede turbulenta, temos a relação entre o perfil de velocidade e a tensão da parede.

Sejam l e u_0 as escalas internas de comprimento e velocidade, definindo variáveis internas,

$$l = \frac{v}{u_\tau}, \quad u_0 = u_\tau, \quad y^+ = \frac{y}{l} = \frac{u_\tau y}{v}, \quad U^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad (3.45)$$

Considerando que a tensão de cisalhamento turbulenta seja aproximadamente constante, chega-se em um perfil logarítmico, da seguinte forma:

$$\frac{U}{u_\tau} = \frac{1}{k} \ln Y^+ + C \quad (3.37)$$

Os valores das constantes são obtidos experimentalmente, mas seus valores geralmente ficam próximos dos mostrados abaixo:

$$\frac{U}{u_\tau} = 2.5 \cdot \ln \left(\frac{u_\tau y}{\nu} \right) + 5 \quad (3.38)$$

A Figura 3.14, em escala logarítmica, mostra os perfis de velocidade adimensionais em função da posição adimensional, para a camada limite. Vê-se a região de transição, a qual não tem seu perfil determinado.

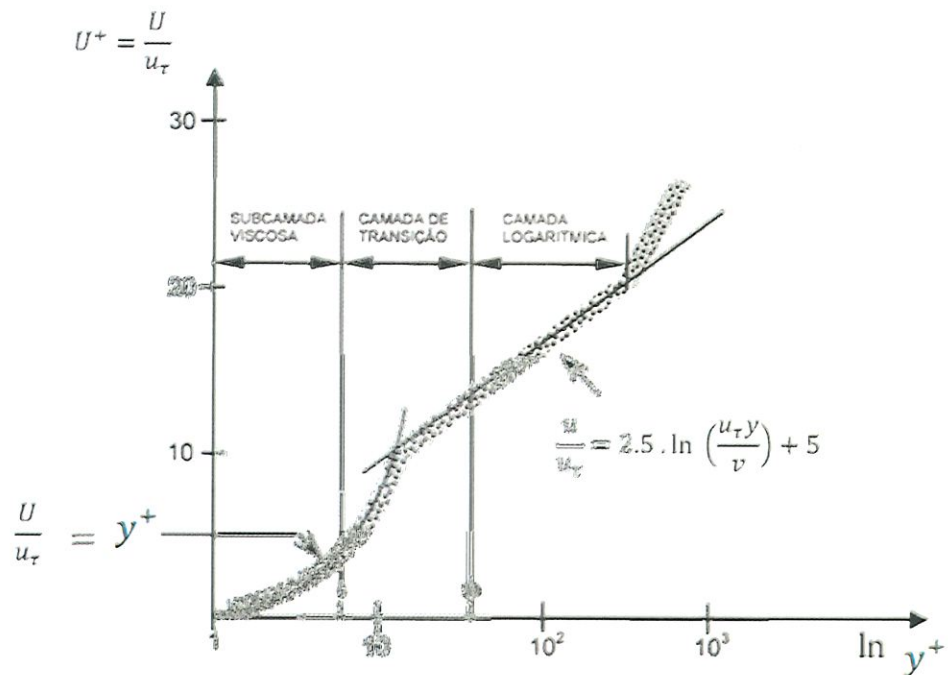


Figura 3.14. Perfil de velocidade adimensionais em função da posição adimensional. Adaptada de (SHAMES, 1973).

CAPÍTULO 4. TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste capítulo será apresentado o sistema experimental do Laboratório de Engenharia Térmica e Fluidos (LETeF) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Serão descritos os equipamentos e materiais utilizados, como: sistema de suprimento de ar, óleo e água, montagem da seção de teste do PIV no tubo horizontal e no duto anular, sistema AWMS no duto anular e câmara de alta velocidade.

4.1. Duto anular

O duto anular consiste em uma seção de teste composta por duas tubulações concêntricas, a tubulação externa é composta por diversos tubos de vidro borossilicato com diâmetro interno de 155 mm, espessura de 5 mm e comprimento de 1,5 m. A seção de teste possui 10,5 m de extensão, obtidos a partir do acoplamento desses tubos através de luvas de PVC. A vedação é realizada com a utilização de anéis de vedação tipo O-Ring. Um tubo de PVC com diâmetro externo de 60 mm foi instalado concêntrico ao tubo de vidro borossilicato de 155 mm. Desse modo, obteve-se uma seção de teste com geometria anular com razão de aspecto de 0,387, diâmetro hidráulico de 95 mm e configuração concêntrica com a capacidade de visualização do escoamento na região anular. “Uma seção de visualização, na forma de um aquário”, Figura 4.1, foi projetada e instalada no duto anular e preenchida com água, com o objetivo de reduzir o efeito de lente devido à curvatura da tubulação. A medição de fração de vazio foi realizada através de uma válvula de três vias com atuador pneumático, que direciona o escoamento, para seção de teste, ou para um by-pass.

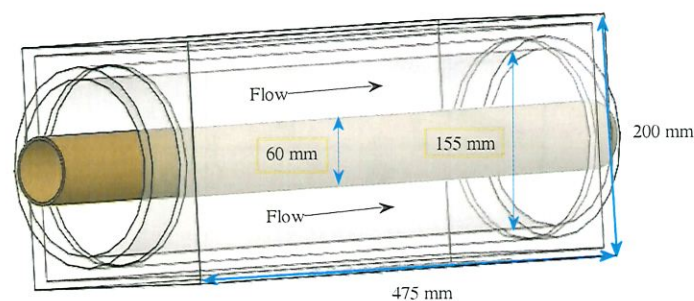


Figura 4.1. Vista esquemática da caixa de visualização na seção de teste no duto anular.

4.2. Descrição do circuito experimental

O fornecimento de água e óleo para as seções de teste é realizado por bombas helicoidais de deslocamento positivo, que é controlada por variadores de frequência via plataforma Labview®. A medição de vazão volumétrica de água é realizada por três medidores: um medidor tipo engrenagem, com faixa de medição entre 1 e 35 l/min, um medidor tipo turbina, com faixa de medição entre 30 e 450 l/min e um medidor de vortex, com faixa de medição compreendida entre 30 e 1600 l/min. A medição de vazão volumétrica de óleo é realizada por três medidores tipo engrenagem, com medições entre 0,042 e 13,8 l/min, de 2,5 a 106,7 l/min e medições de 6,67 a 233,3 l/min. O suprimento de ar é realizado por um compressor tipo parafuso com pressão de trabalho de 7,5 bar e vazão máxima de 3511 l/min. O ar é armazenado em tanques tipo “pulmão”, localizados à montante da seção de teste e das válvulas pneumáticas, evitando oscilação de pressão. A medição de vazão volumétrica de ar é realizada por três medidores tipo turbina, com faixa de medição compreendida entre 14 a 140 l/min, de 140 a 1333 l/min e 560 a 5660 l/min, e um medidor tipo engrenagem com faixa de medição de 1 a 20 l/min.

Para a instalação do sistema PIV na grande seção de ensaio do duto anular do NETeF, foi instalado um tanque de retorno, usado como tanque de água. Este circuito de fluxo secundário foi responsável pelo retorno das partículas do traçador (esferas ocas de vidro) que permitiu a aquisição das imagens com maior precisão. O circuito de fluxo de água foi mantido isolado dos outros componentes do circuito de fluxo multifásico principal, por meio de uma válvula. A seção de teste de 10,5 m de comprimento foi instalada em uma viga robusta de aço inclinável, de 11 m de comprimento, 60 cm de altura e 40 cm de largura, que pode ser inclinada de 0 a 90 graus em relação à horizontal. Uma linha de by-pass permite o uso da técnica de válvula de fechamento rápido (QCV) para medir a fração de vazão *in-situ*.

Os fluidos de teste utilizados nos experimentos foram ar-comprimido e água a 25 °C. Os valores de densidade e viscosidade adotados para a água foram 1000 kg/m³ e 1,225 kg/m³, respectivamente. A Figura 4.2 do plano P&ID apresenta o esquema do circuito experimental, equipamentos e instrumentação, onde são apresentados os principais equipamentos que compõem a instalação experimental requerida para executar os ensaios executados nesse trabalho.

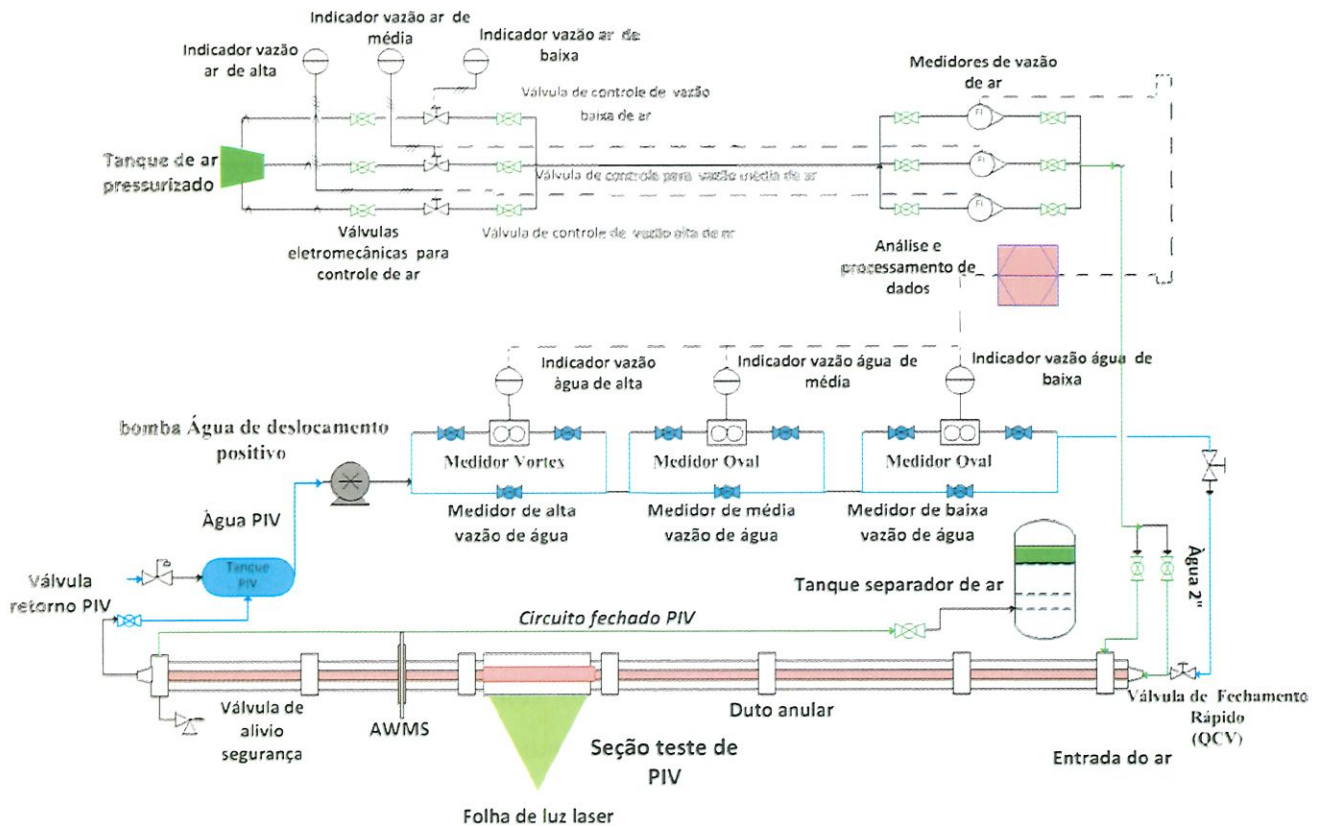


Figura 4.2. Diagrama da instalação experimental, P&ID utilizada no presente estudo.

4.3. Descrição dos equipamentos

4.3.1. Sistema de suprimento de ar

Um compressor do tipo parafuso da Schulz, Modelo 3030, com potência de 30 HP, é responsável pelo suprimento de ar para o sistema, Figura 4.3, operando com uma vazão efetiva de 3511 L/min e pressão de saída (de trabalho) de 7,5 bar, o compressor alimenta um reservatório de ar que equaliza a variação de pressão do sistema, evitando assim variações de pressão inconvenientes para testes em regime permanente. O ar ao sair do compressor é refrigerado por um trocador de calor, seguindo por uma ramificação de três vias contendo uma válvula de controle pneumático em cada. Esse sistema de válvulas é responsável pelo controle pneumático da vazão de ar que chega às linhas de teste.



Figura 4.3. Compressor de ar Schulz.

4.3.2. Sistema de suprimento de água e óleo

A água fica armazenada separadamente em um reservatório ou tanque de polipropileno, e é bombeada para a linha de teste através de uma bomba de deslocamento positivo helicoidal do tipo parafuso acionado remotamente por um inversor de frequência de 12 kW, Figura 4.4. Para o bombeamento de água, foi utilizada uma bomba helicoidal da marca Weatherford com potência de acionamento de 15 CV e potência absorvida de 10 CV, contando com um coeficiente de segurança. A Figura 4.5, mostra as bombas helicoidais de óleo e água utilizadas, respectivamente.



Figura 4.4. Inversores de Frequência.



Figura 4.5. Bomba helicoidal de alimentação de água, ao fundo, bomba helicoidal de alimentação de óleo.

A água é bombeada do tanque de armazenamento, passando por tubulações em PVC até alcançar seção de teste em acrílico. Tanto os inversores de frequência, quanto a rotação do motor da bomba, são controlados manualmente ou remotamente por um programa em plataforma LabView, através do protocolo CAN de comunicação.

4.3.3. Medidores de vazão

Para a medição de vazão de água foram usados dois medidores: para baixas vazões, um medidor de engrenagens modelo OGT da Oval; para vazões altas, foi usado um medidor vórtex modelo EX-DELTA VXW1050 da Oval. Com a intenção de atingir vazões altas, o medidor usado na maioria dos testes foi o EX-DELTA da Oval. Na Figura 4.6 a e b podem ser observados os medidores de água de alta e de baixa vazão, respectivamente. O medidor EX-DELTA funciona pelo princípio da oscilação da esteira de Von Karman.

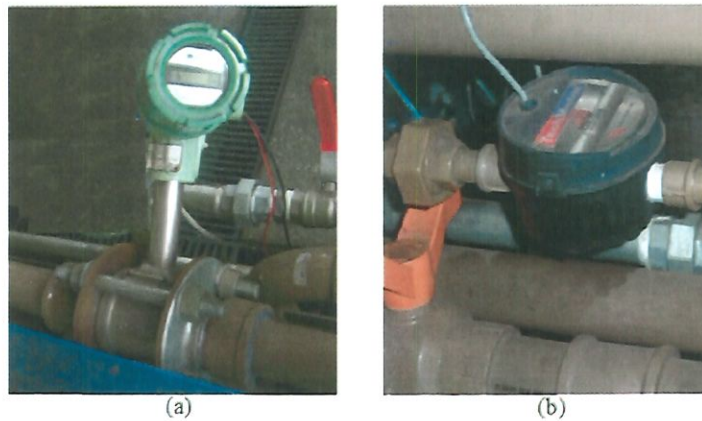


Figura 4.6. Medidores de vazão de água. a) Altas vazões; b) Baixas vazões.

Para medição de vazão do ar, foram utilizados quatro medidores. Para vazões médias, é usado um medidor GAL50 da Oval, Figura 4.7 a que funciona pelo princípio de engrenagens. Para vazões baixas, médias e altas se usam medidores de turbina da Contech modelos SVTG3/8", SVTG1" e SVTG2.1/2", Figura 4.7 b c d. Para fazer correções no cálculo das vazões, devido à compressibilidade do ar, a instalação conta com um transdutor de pressão de 0-5 bar (com uma incerteza do 0,5% FS) e um termopar tipo K (calibrado entre -20 e 40 °C). A faixa e incerteza de medição para os seis medidores citados podem ser vistas na Tabela 4.1.



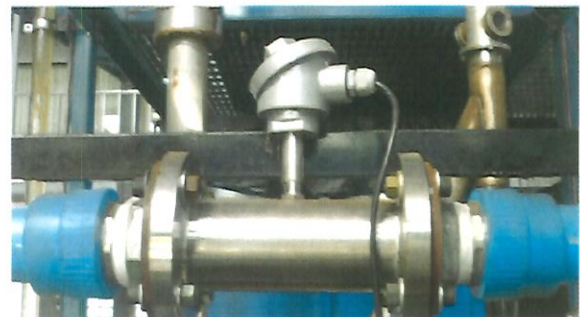
a)



b)



c)



d)

Figura 4.7. Medidores de vazão de ar. a) GAL50 Oval; b) SVTG3/8" Contech; c) SVTG1" Contech; d) SVTG2.1/2" Contech.

O sinal de saída de todos os medidores é adquirido, tratado e convertido em sinal de vazão através de um sistema de aquisição de dados que integra um programa desenvolvido na plataforma LabView e uma placa de aquisição modelo SCB-100 da *National Instruments*. A mesma tem uma velocidade de 200 kHz e uma resolução de medida de 4096 pontos ou 12 bits. Possui 24 portas digitais, 8 entradas diferenciais e 2 saídas analógicas. As portas digitais foram utilizadas somente para o acionamento das válvulas de fechamento rápido e as entradas diferenciais analógicas foram utilizadas para ligar toda a instrumentação. Os atuadores que controlam as vazões de água, ar e óleo são acionados via sistema CAN de baixa frequência.

Tabela 4.1. Faixas de medição dos medidores de vazão de água e ar.

Medidor	Fluido	Vazão	Incerteza (% do valor medido)
OGT Oval	Água	1,0 – 35 L/min	±1,25
EX-DELTA VXW1050 Oval	Água	33,33-1300 L/min	±1,0
GAL50 Oval	Ar	180 - 1200 L/h	±1,0
SVTG3/8" Contech	Ar	0,8-8 m ³ /h	±0,3%
SVTG1" Contech	Ar	8-80 m ³ /h	±0,3%
SVTG2.1/2" Contech	Ar	80-800 m ³ /h	±0,3%

4.3.4. Calibração dos medidores de vazão

Os medidores vieram com uma calibração de fábrica, ou seja, já vieram com um fator de conversão pulso para volume. Entretanto, todas as calibrações de fábrica são verificadas regularmente através da técnica gravimétrica (balança e cronômetro), no caso de água e óleo, para garantir que o erro de medição seja pequeno. Para tal, a vazão lida pelo medidor é comparada com a vazão "real", dada pela razão entre a massa ou volume, deduzidos através da leitura da balança e pelo conhecimento da densidade do fluido, e o tempo, marcado pelo cronômetro.

Segundo a última verificação, feita em janeiro de 2016, as vazões lidas pelos medidores em comparação à vazão "real", obtida pela técnica gravimétrica, apresentaram diferenças de no máximo 5%.

4.4. Montagem da seção de teste do PIV no tubo horizontal

Projetou-se uma bancada experimental em um tubo horizontal para a validação do sistema PIV, onde seria testada a instrumentação e seriam obtidos perfis de velocidades desenvolvidos no regime laminar e turbulento.

Deu-se como solução a montagem do equipamento do PIV ao redor de uma tubulação por meio de uma estrutura com liberdade de giro, para variar a inclinação da câmera e do laser e possibilitar movimentos laterais e transversais. Pretendia-se controlar e manter a relação de 90° entre os planos de captura de imagens e incidência do laser.

A mudança facilitou o posicionamento da câmera e do laser e garantiu o completo desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento, conforme formulação mostrada a seguir, que relaciona o diâmetro da tubulação de teste e o número de Re correspondente, seja este para escoamento laminar ou turbulento.

$$\text{Esc. Laminar} \quad l_{min} = 0,005 * Re * d \quad (4.1)$$

$$\text{Esc. Turbulento} \quad l_{min} = 4,4 * Re^{\frac{1}{6}} * d \quad (4.2)$$

onde d é o diâmetro do tubo e Re é o número de Reynolds considerado.

Foi selecionado um tubo de acrílico com diâmetro interno de 21,1mm, que dá continuidade à linha da tubulação, em conjunto com os outros componentes. Os valores do número de Reynolds estão na faixa adequada, para evitar aqueles em que se apresenta regime de transição. Assim para escoamento laminar se considera $Re \leq 1800$ e para escoamento turbulento, $3000 \leq Re \leq 40000$.

Depois de substituir esses valores nas equações (4.1) e (4.2), é perceptível que o comprimento desenvolvido se dá para o máximo valor de Re de 2000 em escoamento laminar. Assim, se define que para cumprir com a condição de desenvolvimento do escoamento em regime laminar, é necessário um comprimento de tubo de no mínimo 2,09 m. Este é admissível também para regime turbulento, que precisa de um menor comprimento de mistura. Em consequência, a caixa de visualização foi colocada no final do trecho de tubo, que permitiu a captura das imagens com a incidência do laser com um mínimo de distorção óptica. Uma representação, em escala, da montagem final da bancada, é mostrada nas Figuras 4.8 e 4.9.

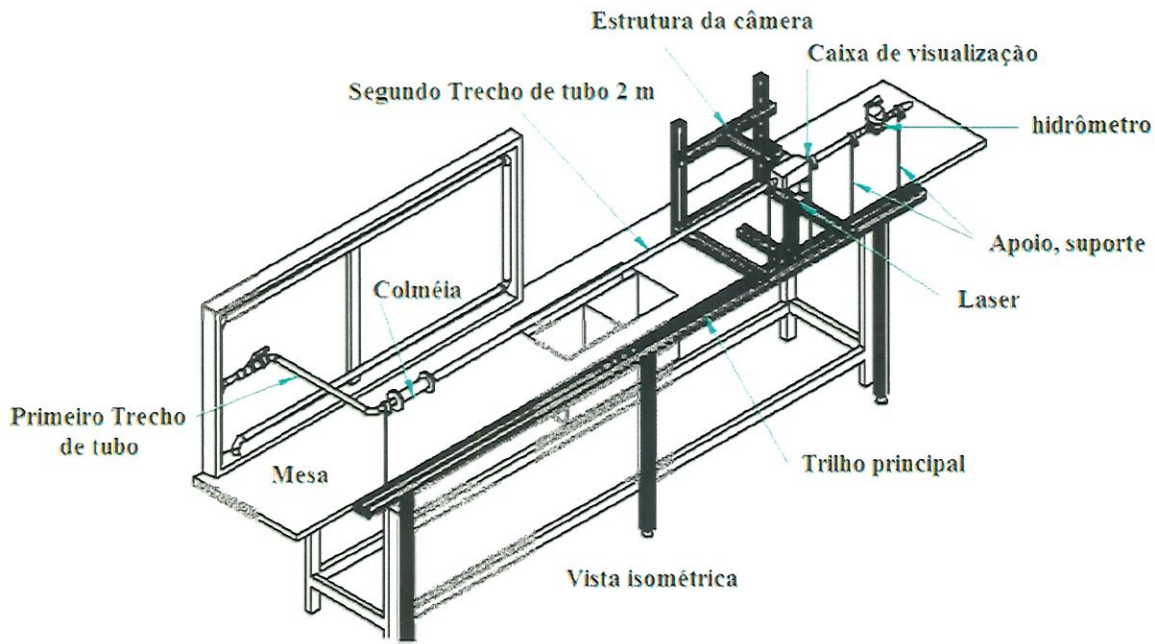


Figura 4.8. Bancada experimental, geometria, dimensões, e distribuição de componentes, vista e perspectiva.

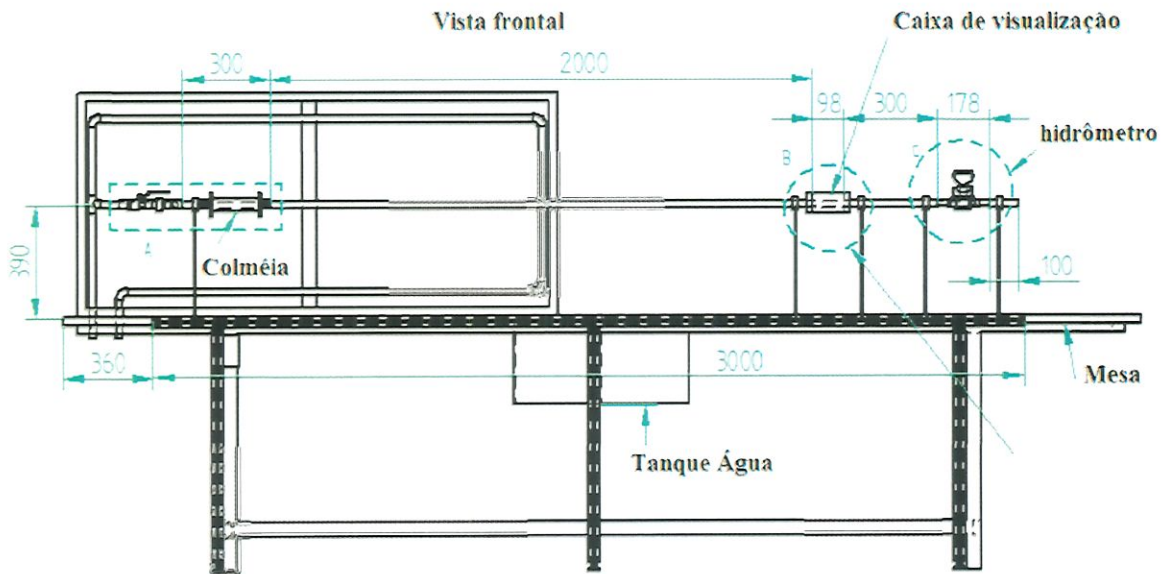


Figura 4.9. Bancada experimental, geometria, dimensões, e distribuição de componentes, vista lateral.

Como mostra a imagem, a característica principal da montagem é extensão para a parte frontal da linha vinda da bancada original. Isto permite a disposição adequada dos equipamentos e o tubo para os testes. O tubo está suportado sobre um trilho principal montado e suportado na mesa. Este consiste em um trecho de 3m de comprimento de perfil de alumínio estrutural, com área de seção transversal de $7,6 \text{ cm}^2$ e ranhuras que permitem a fixação e guia de outros

acessórios. A linha saliente projetada é desmontável da bancada original, ao ter peças de união roscadas no início e final na tubulação e uniões com parafusos na estrutura inferior da mesa, que funciona como suporte.

Pela conformação da montagem da linha, foi preciso colocar após o segundo cotovelo um elemento para homogeneizar o escoamento do fluido. Devido às mudanças súbitas de direção, produzem-se gradientes de velocidade e pressão que precisam ser minimizados para obter o melhor desenvolvimento dos perfis de velocidades. Neste caso, se dispôs um cilindro de diâmetro de 59,8 mm preenchido de bolinhas de vidro de diâmetro médio de 4 mm, presas por duas malhas nos bocais, conformando uma espécie de homogeneizador do escoamento, chamado de “colmeia” (Figura 4.9).

Para obter as imagens por meio da câmera, dispôs-se de um cubo de acrílico sólido de 69 mm^2 de seção transversal, a caixa de visualização. Duas peças de 50 mm e 58 mm de comprimento se unem, para formar uma só caixa. Um furo passante no centro, com diâmetro igual ao diâmetro interno do tubo de acrílico, permite a continuidade da linha. Fazendo às vezes da parede estendida do tubo, o material elimina os erros de refração produzidos na passagem dos raios de luz do laser.

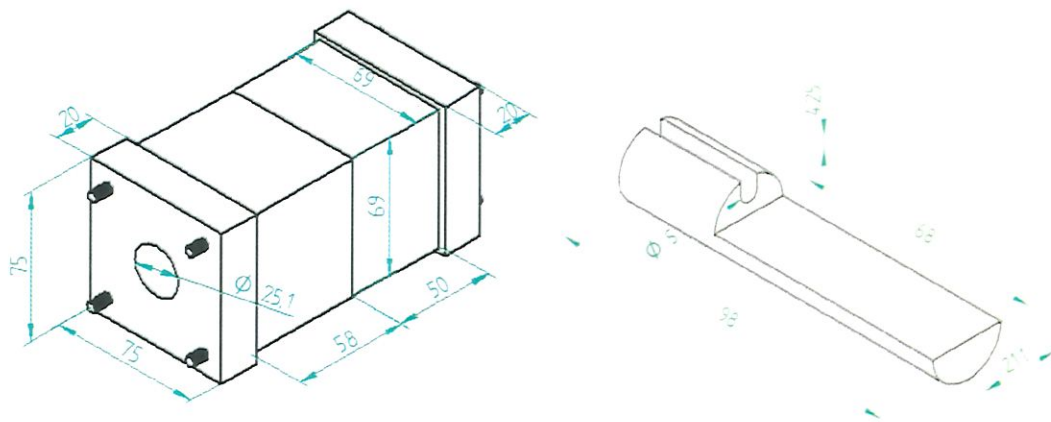


Figura 4.10. Caixa de visualização (esquerda) e gabarito (direita). Geometria.

Dispõe-se de duas peças para que, antes de encaixá-las, coloque-se ao interior do furo uma peça de plástico como a mostrada na Figura 4.10. Esta é utilizada como gabarito de calibração, tal que na base reta mecanizada se colará um desenho de uma malha de pontos que permitirá perceber a distorção da imagem. Esta é feita de pontos com diâmetros específicos de um 1 mm e afastados a uma distância de 1 mm que, ao comparar e processar via software, permite calibrar as imagens durante o estudo. A abertura na parte superior está disposta para que o gabarito, e assim o tubo, fiquem preenchidos completamente de água.

Na peça com maior comprimento (58 mm) estará incidindo o feixe de luz do laser e a câmera. Nesse comprimento foi feita a captura do perfil de velocidades, levando em consideração algumas variáveis, como: o ângulo de abertura do feixe de luz do laser; a velocidade máxima média do fluido (que também afeta o Δt do intervalo entre a captura de duas imagens) que estará dada pelo sistema da linha de experimentos; a distância focal da câmera; e o tamanho da janela de interrogação escolhido.

Para manter um controle mais exato das distâncias de incidência da câmera e do laser em relação ao eixo do tubo, dispôs-se de uma estrutura composta por peças de perfil estrutural de 40 x 40 mm de seção transversal, Figura 4.11. Esta permite o deslocamento, tanto da câmera como do laser, em três direções diferentes: para cima e para baixo, para frente e para trás e lado a lado em sentido axial do tubo. Com estes movimentos, abrangeu-se o total do diâmetro do tubo em seção transversal, pertinente com o estudo proposto, em diferentes planos paralelos de incidência do feixe do laser.

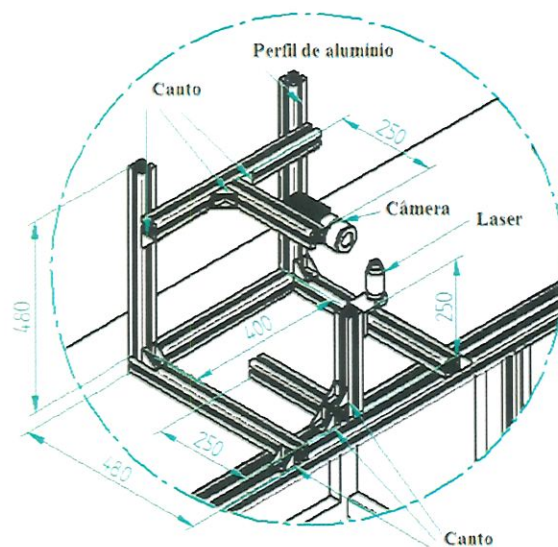


Figura 4.11. Estrutura de apoio para os movimentos câmera e laser.

Vale enfatizar que esta instalação visava somente testes de validação do sistema PIV, por ser este o primeiro projeto de pesquisa a demandar esse equipamento no laboratório. Os testes numa bancada experimental mais simples e em tubulação de seção circular facilitaram o aprendizado no uso do PIV. Entretanto, deve ficar claro que os experimentos que tem relação

direta com a pesquisa foram realizados em uma instalação experimental maior e em duto de geometria anular, que será descrita a seguir.

4.5. Montagem da seção de teste do PIV no duto anular

O equipamento foi instalado no duto anular, que já contava com diversos sensores de pressão e vazão e controles remotos via interface em LabView®. Uma seção de visualização de acrílico, a 4,6 m da injeção dos fluidos, preenchida com água, foi utilizada de forma a minimizar os efeitos de distorção gerados pela água e pela tubulação, prática muito comum quando se trata de análises com imagens em mecânica dos fluidos. A Figura 4.12 mostra o posicionamento inicial da câmera, a 40 cm do duto, a seção de visualização e a montagem do duto.



Figura 4.12. Posicionamento da câmera do PIV para obtenção das imagens.

Os componentes fundamentais da técnica são: o fluido, as partículas traçadoras (*seedings*), o sistema de iluminação, o sistema de aquisição das imagens e o sistema de

processamento das imagens para cálculo das velocidades do escoamento em estudo. Na Figura 4.13, apresenta-se de forma esquematizada o funcionamento de um sistema PIV em duas dimensões (PIV 2D). Partículas traçadoras precisam ser adicionadas ao escoamento, as quais são utilizadas como marcadores: assume-se que as partículas se movem de maneira uniforme com o escoamento. A região a ser analisada é iluminada por um feixe de luz emitido por um laser pulsante. A luz espalhada pelas partículas presentes é gravada por uma câmera de alta velocidade, do tipo CCD, por meio de uma série de imagens apropriadas, cada uma com um instante de tempo determinado, o qual é programado no software LaVision®. O deslocamento das partículas entre os pulsos de luz é determinado a partir da análise das imagens com técnicas de correlação. Como são tiradas muitas imagens, é necessário processar as imagens com técnicas de pré-processamento ou pós-processamento.

A gravação de imagem digital é feita através de uma câmera CCD (*Charge Coupled Device*) (2448 pixel x 2050 pixel, 12 bits, 5 Mpx) que foi posicionada na seção de teste para registrar as partículas traçadoras. O tamanho de partícula era de aproximadamente $10\ \mu\text{m}$ (esferas de vidro ocas), a iluminação foi proporcionada por um laser Nd: YAG de alta potência e duplo-pulso Nd:YAG (Neodymium-doped Yttrium Aluminium Garnet). Para o PIV, o comprimento de onda fundamental é 1064 nm e a frequência dobrada, usando um cristal não-linear como gerador de segundo harmônico (SGH) que converte a luz IR em luz verde visível de 532 nm, com uma intensidade de pulso medida de 70 mJ/pulso, utilizou-se em pulsos duplos a 15 Hz (pulsção) e a duração do pulso de 10 ns (resultando na independência das amostras de velocidade). O laser tem potência máxima de 80 mJ/pulso para o comprimento de onda primário de 532 nm. Como pode ser visto na Figura 4.13, a saída do laser (diâmetro do feixe $D = 4,03\ \text{mm}$) é dirigida através de uma série de componentes ópticos que moldam o feixe resultante numa fina folha de luz. Neste caso, o alinhamento do plano de luz é ajustado de modo que a folha de laser ilumine o plano através do centro do duto anular. O laser funciona como um flash fotográfico para a câmera digital. A câmera é capaz de fornecer 14 imagens por segundo, gravação com a resolução de 2448 pixels x 2050 pixels 5 Mpx, com $f_n = 5$. O sistema com sensor CMOS (complementar óxido de metal-semicondutor) e eletrônica especial suporta a dupla exposição permitindo duas exposições consecutivas. A gravação de ambos os pulsos de luz na mesma trama de imagem para rastrear os movimentos das partículas dá um claro sentido visual da estrutura do escoamento. Para obter informações de velocidade confiáveis, o tempo entre as exposições deve ser selecionado a fim de ter um deslocamento suficiente para alcançar uma resolução de velocidade aceitável, mas o tempo não deve ser tão grande que as partículas se movam para fora do campo de visão ou fora do plano de iluminação. Nas presentes medições, o

tempo de atraso entre as duas imagens é 2500 μs . Um computador é usado para armazenar permanentemente dados de imagem adquiridos pela câmera do PIV. As medições de velocidade e turbulência são feitas calculando a média de 3000 pares de imagens sucessivas. A câmera e o laser são posicionados na seção de teste formando um ângulo de 90° entre o plano de aquisição, determinado pela câmera, e o plano do feixe do laser, como mostrado na Figura 4.13.

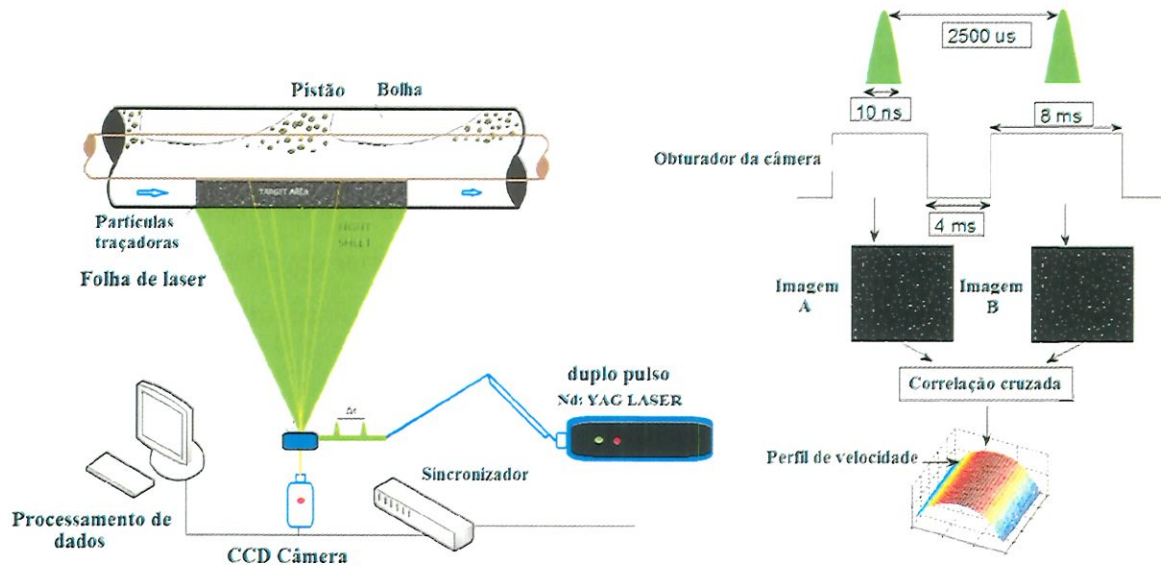


Figura 4.13. Particle Image Velocimetry (PIV). Esquema do funcionamento do sistema PIV.

Para uma determinada velocidade do escoamento e fator de ampliação, o atraso de pulso selecionado ' dt ' determina a separação ' ds ' das imagens de partículas no CCD. A separação ótima das imagens de partículas depende do tamanho da janela de interrogação desejada d_{IntWin} e dos gradientes de velocidade na gravação PIV. Em geral, para a correlação cruzada, a separação das imagens de partículas (em pixels) deve ser maior do que a precisão da detecção de pico e menor que um quarto do tamanho da janela de interrogação selecionada (em pixel):

$$0.1px < ds < \frac{1}{4} d_{IntWin} \quad (4.3)$$

Adicionalmente, o desvio da separação de partículas Δd_s de todos os pares de partículas dentro de uma janela de interrogação deve ser menor do que o diâmetro médio de partícula,

$$d_p: \Delta d_s < d_p \quad (4.4)$$

Isso limita o tamanho máximo da janela de interrogação e a taxa de amostragem, dependendo da turbulência do campo de escoamento observado (KEANE e ADRIAN, 1991).

A calibração da câmera foi feita com uma grelha (*matriz*) de pontos de 1 mm de diâmetro, espaçada a 1 mm de distância, impressa numa folha fina e fixada numa placa de latão colocada no plano da folha de luz. A calibração da imagem da grade foi tomada primeiramente pela câmera com o duto preenchido com o ar, após que a tubulação foi preenchida com água (sem mover a grade) e outra imagem foi tomada pela câmera do PIV. As imagens de calibração obtidas foram utilizadas para derivar uma função de mapeamento. Isso foi feito usando o software Davis 8 da LaVision®. O processamento PIV foi realizado com o mesmo pacote de software. As 3000 imagens do PIV foram processadas utilizando um procedimento multipasse multi-grid adaptável de correlação cruzada, com o tamanho final área de interrogação de 32x32 pixels. As áreas de interrogação foram, em alguns casos, sobrepostas em 50% e em outros casos não se sobrepueram. Finalmente, aplicou-se um filtro de alisamento (*smoothing*) de vetor 3x3.

4.6. Sistema de instalação proposto do sensor AWMS no duto anular

O sensor AWMS foi instalado no duto anular 50 cm a jusante da seção de visualização do PIV, e possuía computadores exclusivos para o sensoriamento e análise dos sinais, como evidenciado pelas Figuras 4.14 e 4.15.



Figura 4.14. Equipamentos ligados à AWMS no duto anular.



Figura 4.15. Equipamentos da AWMS e do PIV no duto anular.

O sistema que permite a instalação do AWMS no duto é apresentado na Figura 4.16 e 4.17. A seção de instalação está compreendida entre o tubo externo transparente e o tubo interno de PVC (marrom). O desenho proposto está composto por dois flanges, cada um com uma seção interna e outra externa. O flange inferior suporta a wire-mesh e o superior suporta a estrutura. A separação entre os flanges é de 50 cm. Esse comprimento corresponde a 10 vezes o comprimento entre as paredes interna e externa dos tubos.

Para a montagem no duto anular procura-se que perto do AWMS as paredes dos tubos sejam contínuas e não apresentem interferências. Assim, o flange do AWMS está composto por dois anéis no interior dos tubos internos e outros dois no exterior do tubo externo. Os flanges internos vão colados junto ao tubo interno. Um pequeno degrau suporta o tubo em toda a área da parede. Assim, a pressão que gera a seção do tubo não é suportada pelo sensor. Nas duas faces que estão em contato com o sensor existe uma cavidade para vedar com o-rings da Série 2-035. Os anéis externos unem-se com parafusos, mantendo o AWMS centrado. Cavidades em ângulo permitem colocar o-rings Ref 37051101 (Serie B – DN150, Marca Tigre) para realizar a vedação, Figura 4.17.

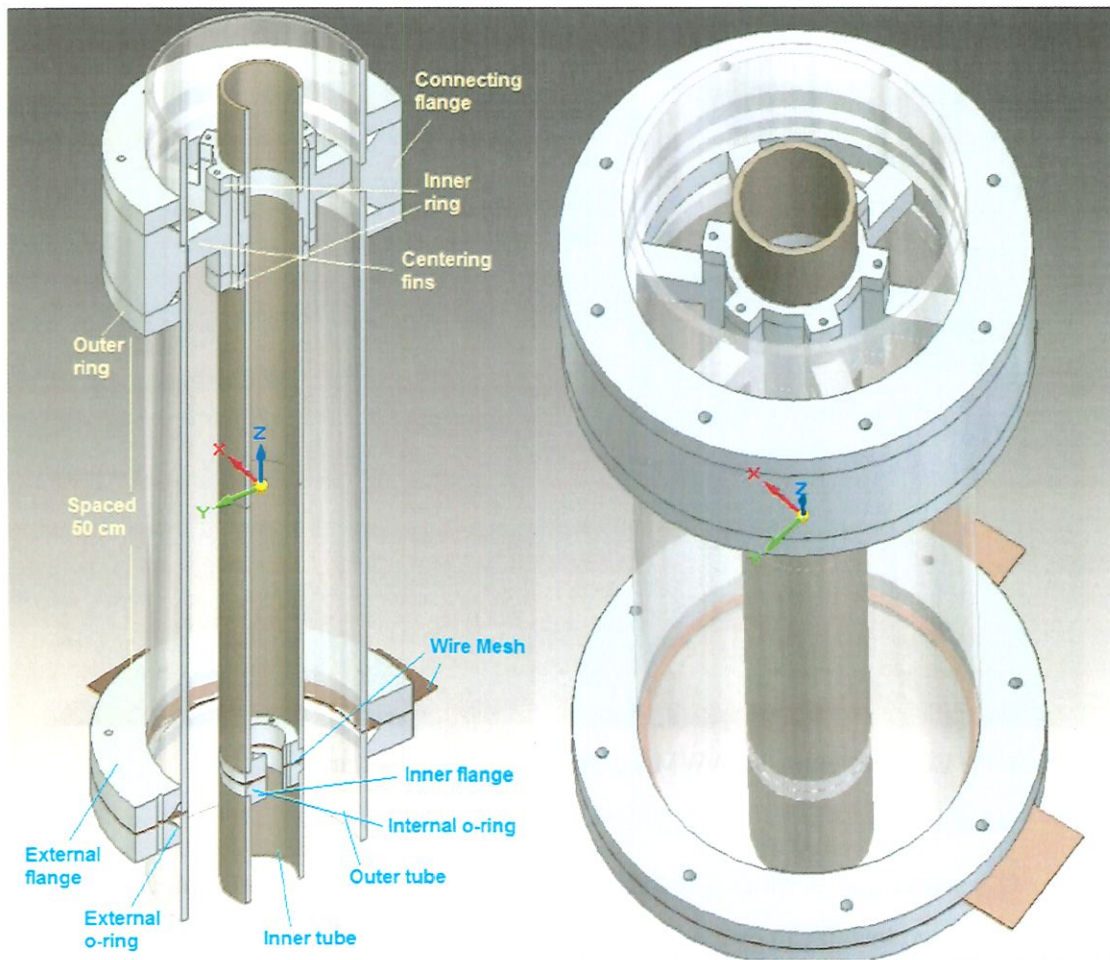


Figura 4.16. a) Corte longitudinal da seção de instalação, com os flanges superior e inferior e o AWMS; b) Vista lateral da seção de instalação.

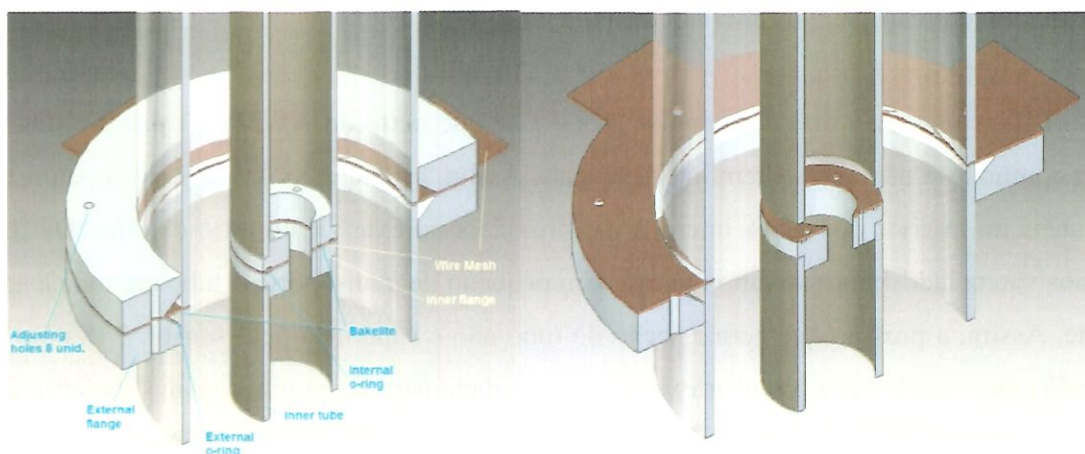


Figura 4.17. a) Corte transversal e detalhe do flange inferior com seus anéis e b) detalhe da posição do AWMS.

Os furos para os parafusos, nos anéis externos e internos, estão distribuídos de forma que não interfiram com os fios do sensor. Os parafusos internos têm influência no diâmetro final interno do anel. Para o tubo interior se tem uma redução do diâmetro de 34% (passando de 53 mm ID, para 35,09 mm).

O flange superior está constituído de um corpo principal que suporta os anéis internos e externos, Figura 4.18. O flange superior tem a função de que os tubos permaneçam centrados e alinhados. Além de dar rigidez e estabilidade à montagem. Para isso, seis aletas conectam o anel interno ao externo. Os dois anéis internos têm forma de estrela e permitem o confinamento de o-rings Série 2-141 para a vedação. Os anéis externos trabalham de igual maneira que os anéis externos do flange inferior, alinhando os tubos externos e suportando os o-rings de vedação. Em cada lado, as paredes internas e externas estão apoiadas em degraus para facilitar o ajuste dos tubos e a vedação. Em etapas posteriores deve-se desenhar a seção de acoplamento do tubo interno inferior. Essa seção deve manter alinhado o tubo interno, de forma tal que não exerça força no sensor wire-mesh.

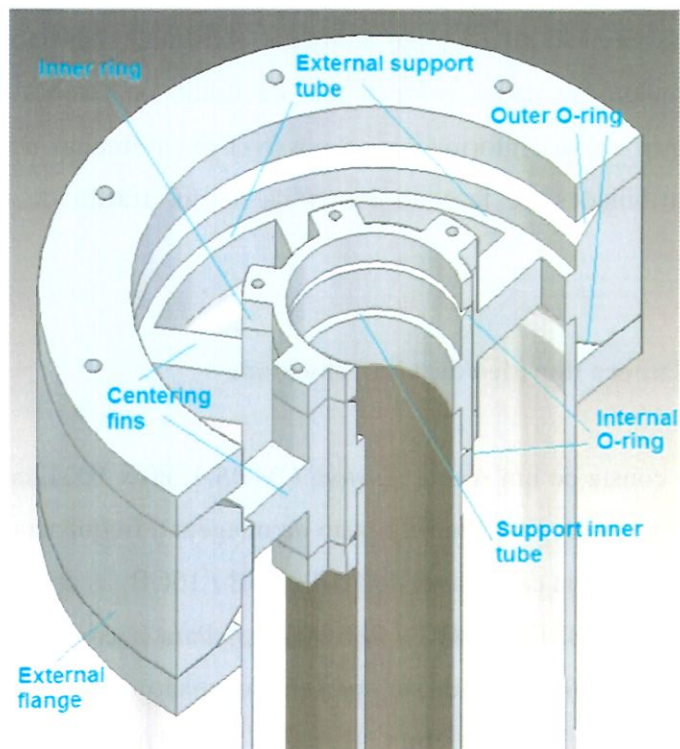


Figura 4.18 . Corte transversal e detalhe do flange Superior com seus anéis.

4.6.1. Princípio de funcionamento do sensor AWMS no duto anular

O sensor AWMS é feito essencialmente de duas matrizes de eletrodos de fios, transmissor e receptor, que fazem um ângulo de 90 em relação uns aos outros (Figura 4.19 e 4.20). O protótipo utilizado nos experimentos foi projetado e construído no LETeF, da EESC-USP, e consiste em uma malha de arames de 16 x 16 fios, o espaçamento axial das matrizes de fios é 1,4 mm e cada fio é separado 9.6875 milímetros um do outro. O sensor foi instalado no duto anular de diâmetro externo de 155 mm e diâmetro interno de 60 mm, os fios são feitos de aço inoxidável 316 com um diâmetro de 0,2 mm; assim, o sensor tem um fator de intrusão de 4,08% (Figura 4.20). O sensor foi concebido para obter “scans” da seção transversal da instalação do duto anular. Em cada ponto de cruzamento entre os fios é medida a permissividade complexa do fluido, que é equivalente a medir a resistência elétrica e capacitância, simultaneamente. O espaço entre os eletrodos, os pontos de cruzamento, é preenchido com os fluidos. Cada fio transmissor (vermelho) é ativado em sequência, enviando um sinal elétrico através do fluido; assim, cada fio do receptor (azul) carrega um sinal que contém as informações para identificar as características dos fluidos presentes em cada ponto de cruzamento, Figura 4.19. Os transmissores não ativos estão aterrados. Ativando o último fio transmissor, é obtido um conjunto completo de dados sobre o tipo de fluido ou frações de fase em toda a seção transversal. A partir dessas informações, é possível obter frações de fase médias transversais instantâneas, distribuições de fase ao longo da seção, fração de vazio e imagens 2D do escoamento.

4.6.2. Câmera de vídeo de Alta velocidade

A câmera consta de um sensor *Custom* CMOS 1280 x 1024, com velocidade máxima de gravação 150.000 *fps*, mas para alta resolução de imagem a frequência máxima de gravação é de 2000 *fps*. Ela tem memória expansível de 4GB / 8GB / 16GB, as opções de disparo (Trigger) são de 0,5V TTL/Normal/ BROCC/ ROC / Movimento. Para a conexão ao computador usa-se o protocolo ethernet Gigabit. Além disso, apresenta conexão de lente F-mount. As dimensões da câmera são de 112 mm (W) x 141 mm (H) x 341 mm (L), a câmera pode ser operada com a unidade de controle de visualização (CDU) ou por um computador com conexão Ethernet.

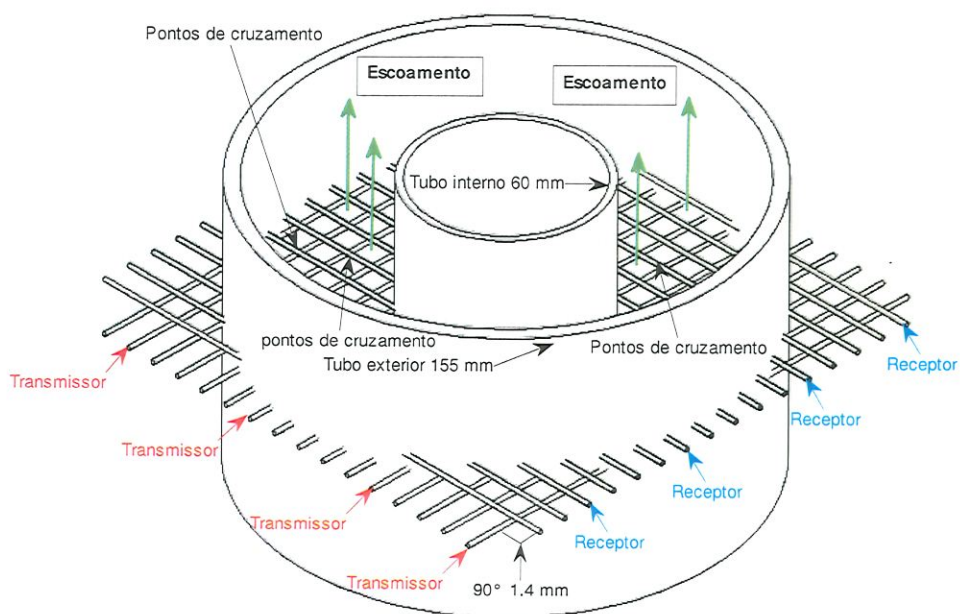


Figura 4.19. Representação esquemática do anular sensor (AWMS), com sua localização em um duto anular vista lateral.

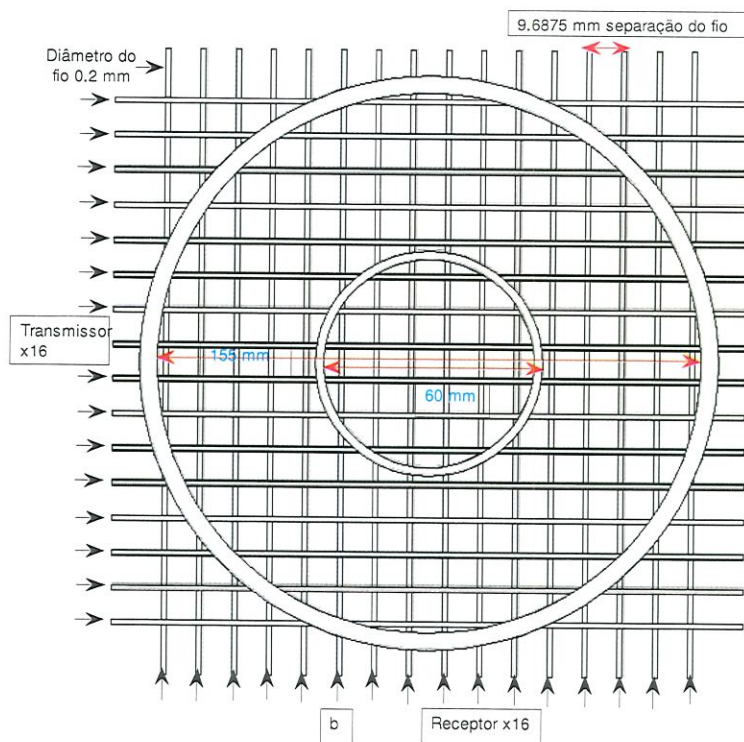


Figura 4.20. Representação esquemática do anular sensor (AWMS), com sua localização em um duto anular, vista transversal.

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No seguinte capítulo descreve-se a aplicação de PIV em escoamentos laminares e turbulentos monofásicos, em tubo horizontal, e bifásicos ar-água nos padrões pistonado e estratificado, em um grande duto anular com duas razões de aspecto. Flutuações de velocidade (*rms*), tensões de cisalhamento de Reynolds, funções densidade de probabilidade (PDF) e velocidades instantâneas são determinadas e analisadas. Finalmente, apresenta-se o sistema inovador implementado para a medição de propriedades de escoamentos bifásicos por meio da AWMS, do PIV e da câmera de alta velocidade e os novos resultados obtidos no duto anular.

5.1. Resultados experimentais com PIV em tubo horizontal

Descrevem-se os resultados da aplicação do sistema PIV em um tubo horizontal com a finalidade de calibrar e validar os resultados em escoamento laminar e turbulento.

5.1.1. Escoamento laminar em um tubo horizontal

Para a validação dos resultados utilizou-se a velocidade axial derivada analiticamente, u , para escoamento laminar, definida pela equação (5.1) (MCDONALD, 1996).

$$\frac{u}{v_m} = \left[1 - \left(\frac{2r}{D_T} \right)^2 \right] \quad (5.1)$$

onde r é coordenada radial, v_m é a velocidade média do escoamento D_T é o diâmetro do tubo.

O escoamento laminar foi obtido para $Re = 473$, a velocidade média analítica é igual a $1,2 \text{ m/s}$ e a velocidade média obtida por o PIV é igual a $1,3 \text{ m/s}$. As componentes de velocidade média nas direções paralelas (axiais, $U_{média}$) e normais à parede (radial, $V_{média}$) são calculadas pela equações (5.2) e (5.3) como se segue, segundo Kumara et al. (2010a).

$$U_{média} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (5.2)$$

$$V_{m\u00e9dia} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \quad (5.3)$$

$U_{m\u00e9dia}$ e $V_{m\u00e9dia}$ representam a soma de todos os quadros (*frames*) divididos pelo n\u00famero de quadros (N quadros), u_i e v_i representam as componentes de velocidade instant\u00e2neas, ou seja, cada quadro, nas dire\u00e7\u00f5es paralela e normal ao escoamento, respectivamente.

Na Figura 5.1, v\u00ea-se o perfil de velocidade axial calculado experimentalmente pelo PIV e o perfil obtido pela solu\u00e7\u00e3o anal\u00edtica dada pela equa\u00e7\u00e3o (5.1).

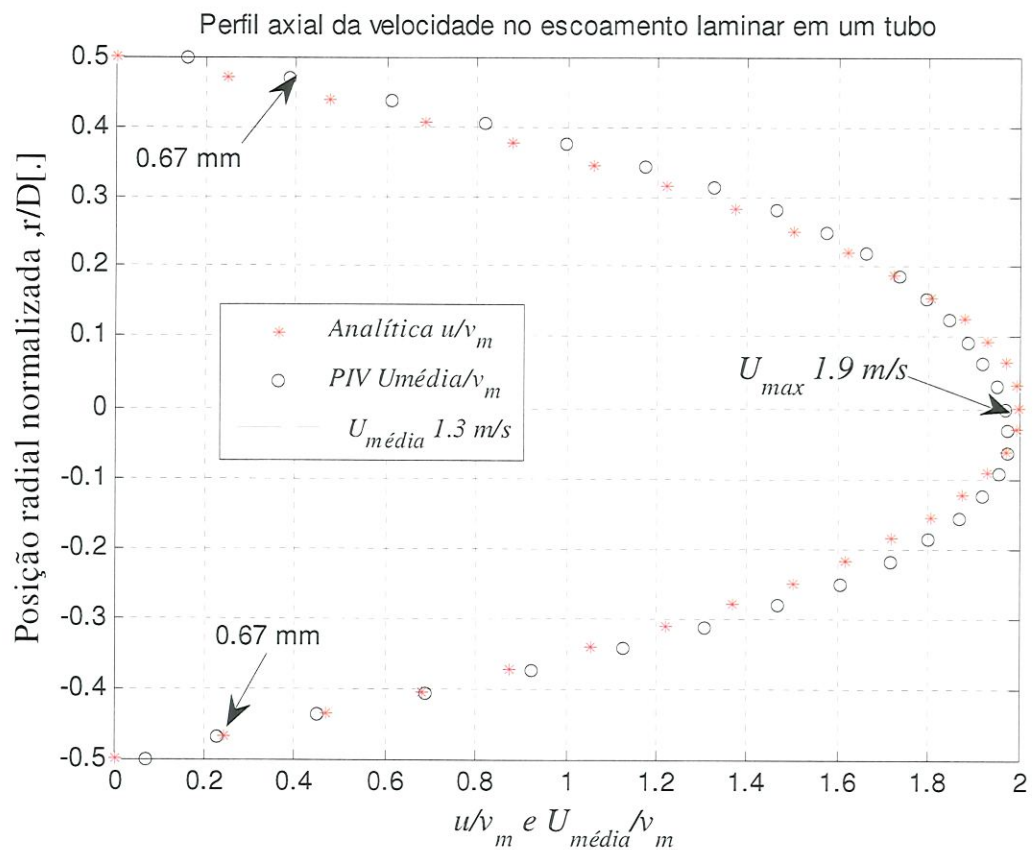


Figura 5.1. Perfis de velocidade adimensional das componentes para fluxo laminar $U_{m\u00e9dia}$ para ($Re = 473$), com a velocidade na dire\u00e7\u00e3o axial.

O erro, calculado para 31 pontos espa\u00e7ados 0,81 mm ao longo do perfil, isto \u00e9, entre a parede superior e inferior do tubo, foi de 3,8%. Este erro \u00e9 obtido pela soma de erros dividida por 31, dado pela equa\u00e7\u00e3o (5.4). Pode-se estimar que as medi\u00e7\u00f5es de velocidade s\u00e3o confi\u00e1veis at\u00e9 0,67 mm de dist\u00e2ncia da parede, Figura 5.1.

$$e(\%) = 100 \frac{|V_{\text{pontosPIV}} - V_{\text{pontosAnalítica}}|}{V_{\text{pontosPIV}}} \quad (5.4)$$

A velocidade na direção radial r (velocidade v) para o escoamento laminar totalmente desenvolvido, o ideal é que a velocidade na direção radial deve ser zero ($v=0$). De tal modo, espera-se um valor adquirido experimentalmente próximo de zero ou pequeno comparado com a velocidade máxima na direção axial, $U_{max} = 1,9$ m/s, Figura 5.2. O maior valor, em relação à velocidade máxima na direção axial, foi localizado na região próxima à parede, onde os erros são maiores devido à diferença dos índices de refração e à presença de gradientes de velocidade mais altos (VAN DOORNE e WESTERWEEL, 2007; PALACIOS, 2011). Os altos erros ocorrem entre $r = 0,5$ (21,1 mm) e $r = 0,4$, ou seja, a 2,1 mm de distância da parede superior no tubo, com um desvio máximo de 0,0068, como é mostrado na Figura 5.2.

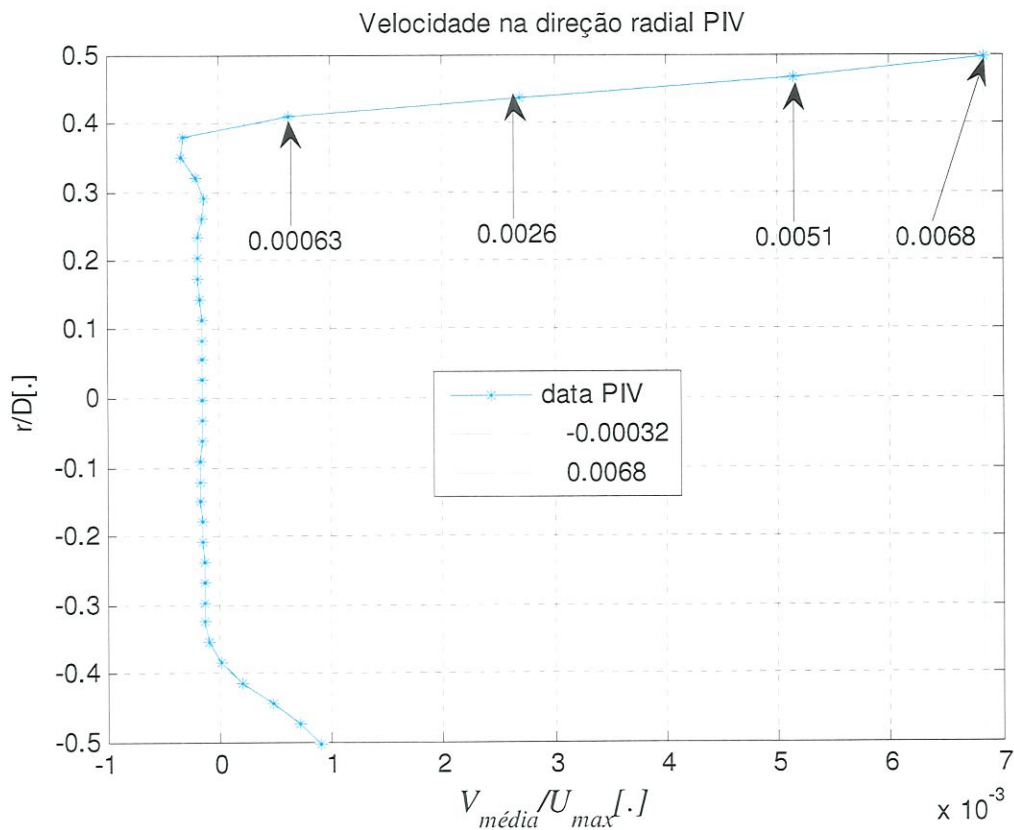


Figura 5.2. Perfil de velocidade adimensional na direção radial.

5.1.2. Escoamento turbulento em um tubo horizontal

A distribuição de velocidade do escoamento turbulento totalmente desenvolvido pode ser convenientemente estimada usando a lei de potência, equação (5.5), segundo, Kays et al., (2005).

$$u = U_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{1/n} \quad (5.5)$$

Na Figura 5.3, compara-se o perfil analítico com o perfil experimental obtido pelo PIV. Os perfis parecem ter a mesma tendência, mas com maiores erros na área próxima à parede e à linha central, conforme o esperado.

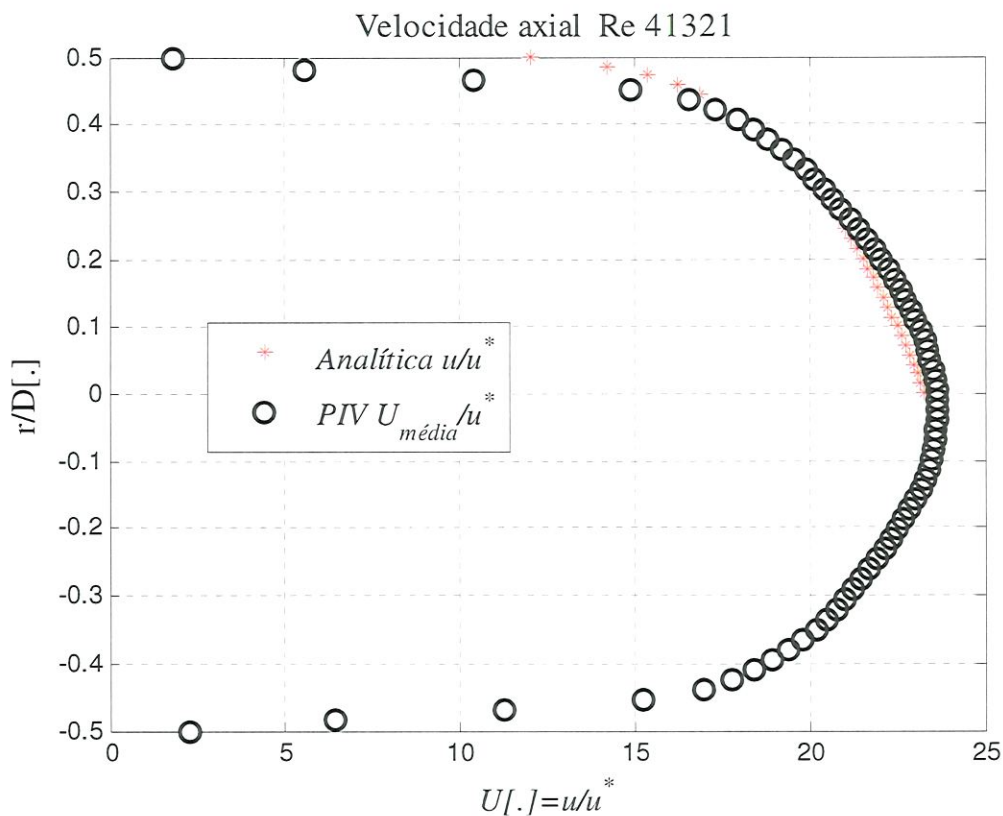


Figura 5.3. Distribuição de velocidade axial adimensional para PIV ($U_{média}/u^*$) e Analítica, $U[.] = u/u^*$ para escoamento turbulento em um tubo horizontal.

O erro foi calculado para o intervalo de $r = 0$ (10,55mm) até $r = 0,4$ (18,99 mm), tendo em conta todos os erros entre este intervalo, somando-os e dividindo-os pelo número total, o erro total médio obtido foi de 4,4%, dado pela equação (5.4) .

O escoamento turbulento foi tomado para $Re = 41321$, onde a velocidade média calculada pela lei de potência é igual a 1,96 m/s e a velocidade média calculada pelo PIV é igual a 1,90 m/s.

A velocidade de fricção u^* foi calculada na gama de Re estudada usando a abordagem semi-empírica de Blasius, (SCHLICHTING, 1979; KAYS et al., 2005), segundo a equação 5.6. Assim, o valor u^* é dado por:

$$u^* = \sqrt{\frac{0.0791 \cdot Re^{-1/4}}{2}} v_m \quad (5.6)$$

onde $U[.] = u/u^*$

5.1.3. Tensão de cisalhamento de Reynolds para escoamento turbulento em um tubo horizontal

A magnitude da tensão de cisalhamento de Reynolds tem picos próximos da parede inferior do tubo com um valor máximo negativo de $-0,24 \text{ kg/ms}^2$, devido a grandes gradientes de velocidade axial e um valor máximo positivo na parede superior do tubo, que é de $0,17 \text{ kg/ms}^2$. Os picos nos perfis de V_{rms} e tensão Reynolds estão aproximadamente localizados nas mesmas posições radiais como mostrado na Figura 5.4.

As componentes da velocidade média quadrática ou velocidade de flutuação (*rms*) foram estimadas como segue pelas equações (5.7) e (5.8), em que u_i e v_i representam as componentes da velocidade instantânea nas direções perpendicular e normal da parede, respectivamente. Esta observação é confirmada pelo trabalho de Kumara et al. (2010), Elseth (2001), Toonder et al. (1997), Eggels et al. (2006) e Westerweel, et al. (1996). As velocidades quadráticas médias U_{rms} e V_{rms} descrevem as flutuações da velocidade nas direções horizontal (axial) e vertical (radial) respectivamente.

$$(5.7)$$

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - U_{média})^2}$$

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i - V_{média})^2} \quad (5.8)$$

As tensões de cisalhamento de Reynolds foram calculadas, pela equação (5.9) de acordo com (KUMARA et al., 2010; ELSETH, 2001; TOONDER et al., 1997; WESTERWEEL et al., 1996; PEIXINHO et al., 2005; MOSER et al., 1999) em que u_i e v_i representam as componentes da velocidade instantânea nas direções perpendicular e normal da parede, respectivamente.

$$\overline{\rho u'v'} = \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (u_i - U_{média})(v_i - V_{média}) \quad (5.9)$$

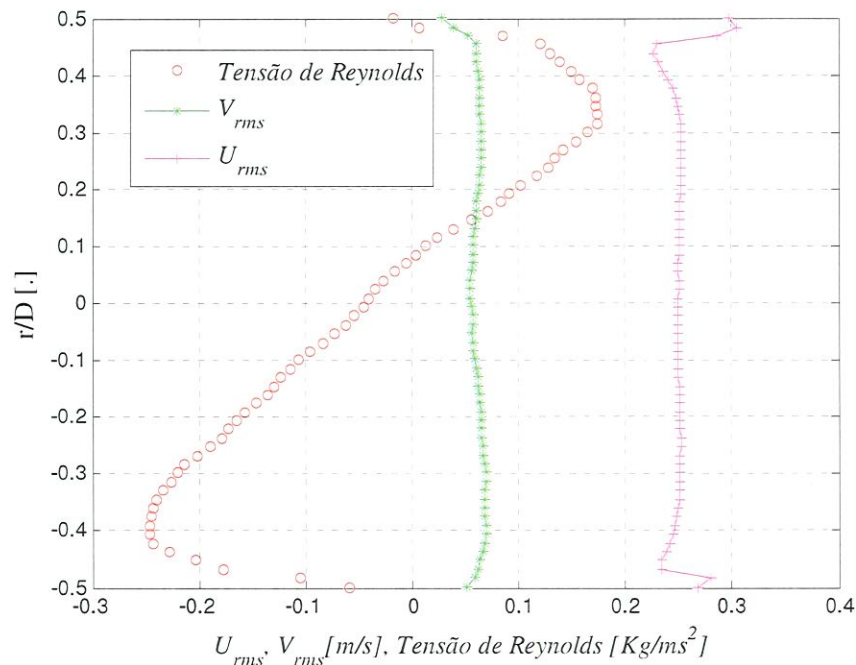


Figura 5.4. Flutuações da velocidade axial e radial média (*rms*), e tensões de Reynolds para escoamento turbulento em um tubo horizontal, para $Re = 41321$, em que a velocidade média calculada pela lei de potência é igual a $1,96 \text{ m/s}$.

Algumas das imprecisões observadas, Figura 5.4, podem ser explicadas pelo posicionamento do laser e da tubulação de teste. Entretanto, considera-se que os resultados preliminares são satisfatórios.

5.2. Resultado experimental do PIV no duto anular

Depois de validar o sistema PIV no tubo horizontal, continua-se com a análise no duto anular, onde são calculados e analisados os perfis de velocidade em regime laminar e turbulento. Além disso, são analisadas características da turbulência, tanto para escoamento monofásico de água e bifásico água-ar no padrão de escoamento pistonado.

5.2.1. Escoamento laminar em um duto anular

Foram realizados experimentos em um duto anular de grande porte formado por um tubo interno de diâmetro externo de 60 mm ($r_{min}=30\text{ mm}$), e o tubo externo com um diâmetro interno de 155 mm ($r_{max}=77,5\text{ mm}$) com razão de radio de $\alpha_r = 0.387$. Foi aplicado o mesmo sistema PIV usado no tubo horizontal e sua precisão tinha que ser validada para essa geometria. Portanto, analisou-se um escoamento laminar monofásico com uma vazão volumétrica de $0,000125\text{ m}^3/\text{s}$, ($j_w = 0,0078\text{ m/s}$) e um $Re = 742$. O fluido era água e a dimensão característica utilizada no cálculo de Re foi o diâmetro hidráulico, de 95 mm. O duto anular estava inclinado ascendentemente em 5° com relação à horizontal, com o propósito de gerar escoamento pistonado. O número de Reynolds foi escolhido de modo a garantir o completo desenvolvimento hidrodinâmico do escoamento.

O perfil de velocidade do PIV foi então comparado com o perfil analítico, definido pela equação 5.10, segundo Munson e Young (2004).

$$u_a(r) = -\frac{\Delta P}{L.4\mu} \left[r^2 - r_{max}^2 + \frac{r^2 - r_{max}^2}{\ln \frac{r_{max}}{r_{min}}} \ln \frac{r}{r_{max}} \right] \quad (5.10)$$

onde u_a é a velocidade axial no duto anular, r é a posição radial, $\Delta P/L$ é a queda de pressão por unidade de comprimento e μ é a viscosidade do fluido, tomada como 10^{-3} Ns/m^2 .

A queda de pressão por unidade de comprimento teve que ser calculada; pois não podia ser medida pelos instrumentos disponíveis, devido a sua baixa magnitude. Então foi calculada pela equação (5.11), segundo Munson e Young (2004).

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8Q\mu \ln \frac{r_{\max}}{r_{\min}}}{\pi \left[\ln \frac{r_{\max}}{r_{\min}} (r_{\max}^4 - r_{\min}^4) - (r_{\max}^2 - r_{\min}^2)^2 \right]} \quad (5.11)$$

onde Q é a vazão volumétrica em m^3/s .

Analisando-se a equação (5.10), não se espera que a posição radial de velocidade máxima (r_m) esteja no centro do duto anular, mas um pouco mais perto do tubo interno. Dando $r_m = 51,86 \text{ mm}$, segundo a equação (5.12), enquanto o centro da seção está em $r_{med} = 53,75 \text{ mm}$, calculado da seguinte maneira; $47,5 \text{ mm} / 2 = 23,75$, $23,75 + 30 = 53,75 \text{ mm}$; ver Figura 5.5 . As posições radiais são medidas a partir do centro dos tubos.

$$r_m = \left[\frac{(r_{\max}^2 - r_{\min}^2)}{2 \ln \left(\frac{r_{\max}}{r_{\min}} \right)} \right]^{1/2} \quad (5.12)$$

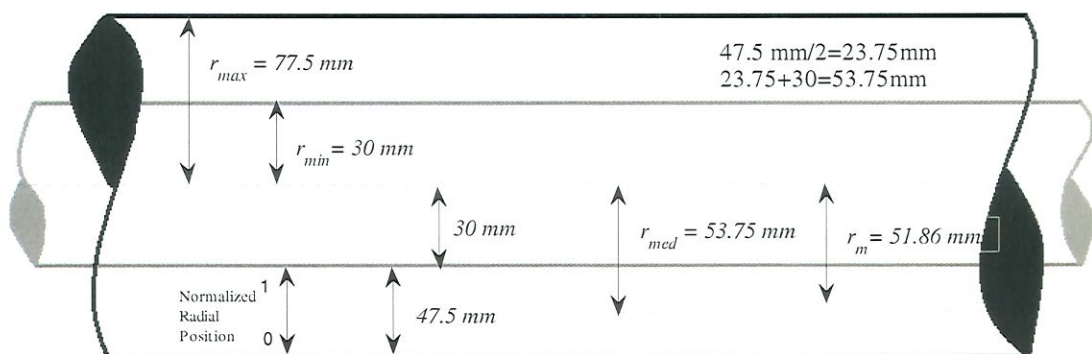


Figura 5.5. Escoamento em um duto anular.

Ambos os perfis são mostrados na Figura 5.6, o analítico, definido pela equação (5.10), e o do PIV, onde v_{ma} é a velocidade média do escoamento no duto, calculada pela vazão volumétrica dividida pela área da secção transversal.

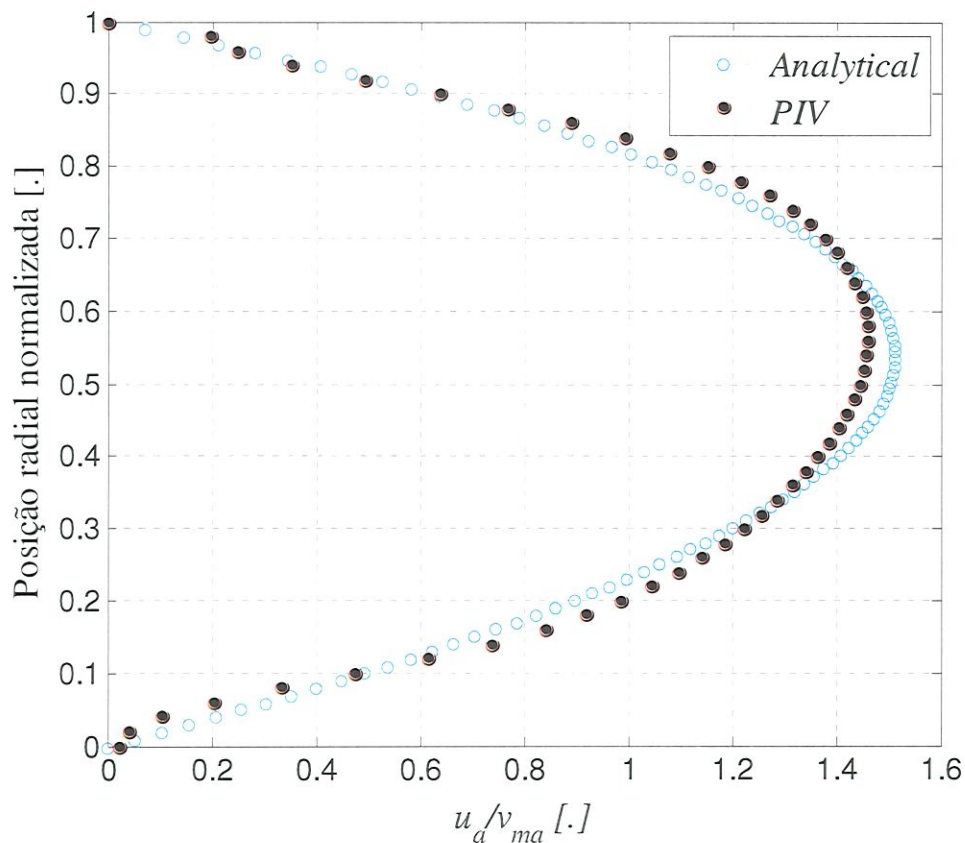


Figura 5.6. Velocidade adimensional calculada experimentalmente PIV e analiticamente para escoamento laminar no duto anular.

A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos erros máximos, mínimos e médios para a análise do PIV em um escoamento de tubo e duto anular.

Tabela 5.1. Erros no escoamento laminar e turbulento no tubo e no duto anular.

Tubo/duto anular	Tabela de erro		
	Máximo erro	Mínimo erro	Média erro
Escoamento laminar em tubo	6%	0,2%	3,8%
Escoamento turbulento em tubo	5,3%	1,4%	4,4%
Escoamento laminar em duto anular	7%	1,2%	4,4%

O perfil de velocidade, da Figura 5.6, calculado experimentalmente por PIV concorda bem com o analítico, com um erro médio de 4,4% (Tabela 5.1), o erro de cada ponto foi calculado pela equação (5.4) e a média foi tomada dividindo-se pelo total de pontos.

5.2.2. Velocidade axial média quadrática, U_{rms} , para escoamento laminar no duto anular.

Pode-se ver, na Figura 5.7, a velocidade axial média quadrática ou velocidade de flutuação axial U_{rms} definida pela equação (5.7), mostrando o seu máximo entre -0,3 e 0,3 da posição radial, o que concorda com a Figura 5.6.

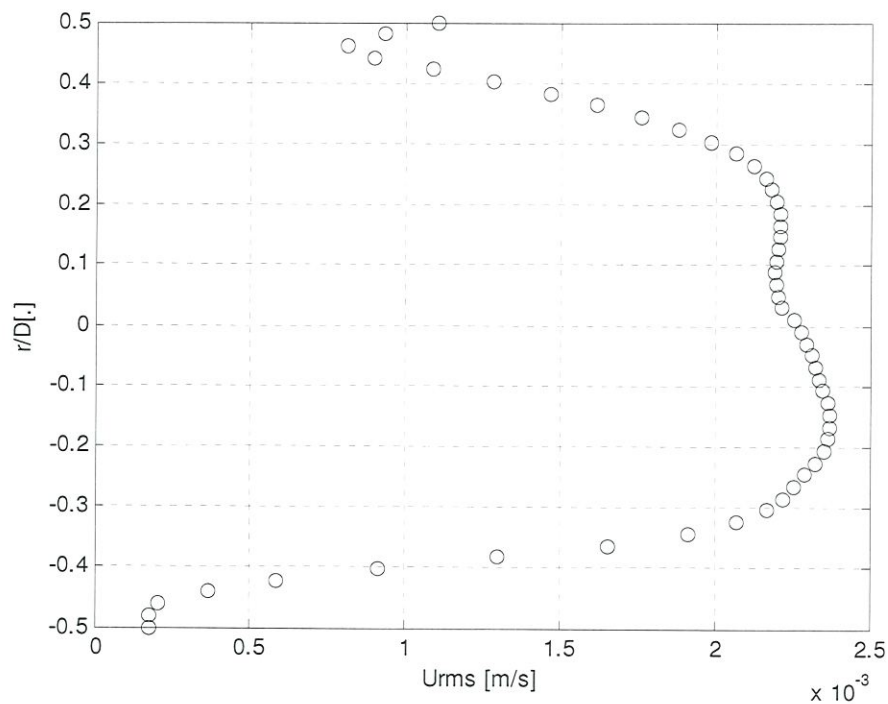


Figura 5.7. Velocidade axial média quadrática, U_{rms} , para escoamento laminar em um duto anular.

5.2.3. Escoamento turbulento no duto anular

Os escoamentos turbulentos no duto anular foram tomados para um $Re = 14546$, com uma velocidade média do PIV v_{ma} de $0,1483 \text{ m/s}$, e para um $Re = 20583$, com uma velocidade média do PIV v_{ma} de $0,2046 \text{ m/s}$. Os perfis de velocidades foram plotados juntos, segundo as

velocidades médias $U_{média}$ definidas pela equação (5.2), onde era esperado que tivessem a mesma forma, Figura 5.8.

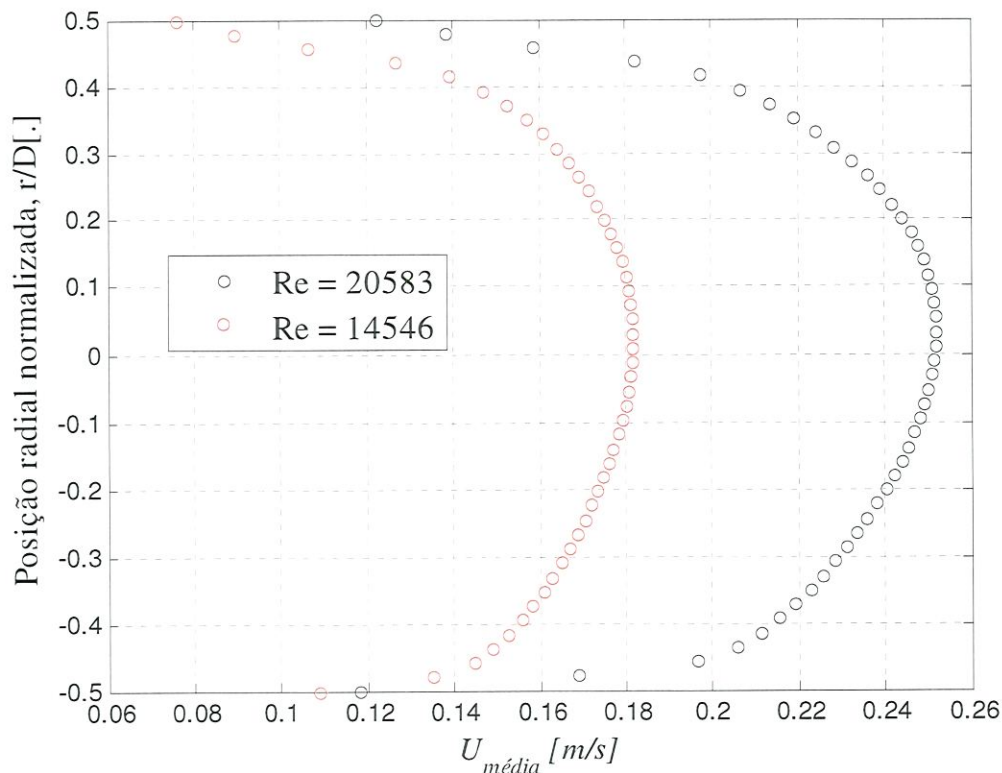


Figura 5.8. Perfil de velocidade axial dado pelo PIV, $U_{média}$, para escoamento turbulento no duto anular.

5.2.4. Velocidades quadráticas médias U_{rms} ou flutuações da velocidade na direção horizontal (axial) no duto anular

Pode-se ver na Figura 5.9 o U_{rms} definido pela equação (5.7) para dois escoamentos turbulentos. As flutuações máximas para o número de Reynolds estão entre a posição radial de 0,4 a 0,5 e -0,4 a -0,5. Os maiores desvios ou flutuações acontecem perto da parede para os dois Re, devido à presença de gradientes de velocidade maiores. Apesar de tudo, de modo similar é observado que os dados experimentais obtidos expõem adequada concordância com os dados encontrados na literatura para tubos de Kumara et al. (2010), Elseth (2001), Toonder et al. (1997), Eggels et al. (2006) e Westerweel, et al. (1996).

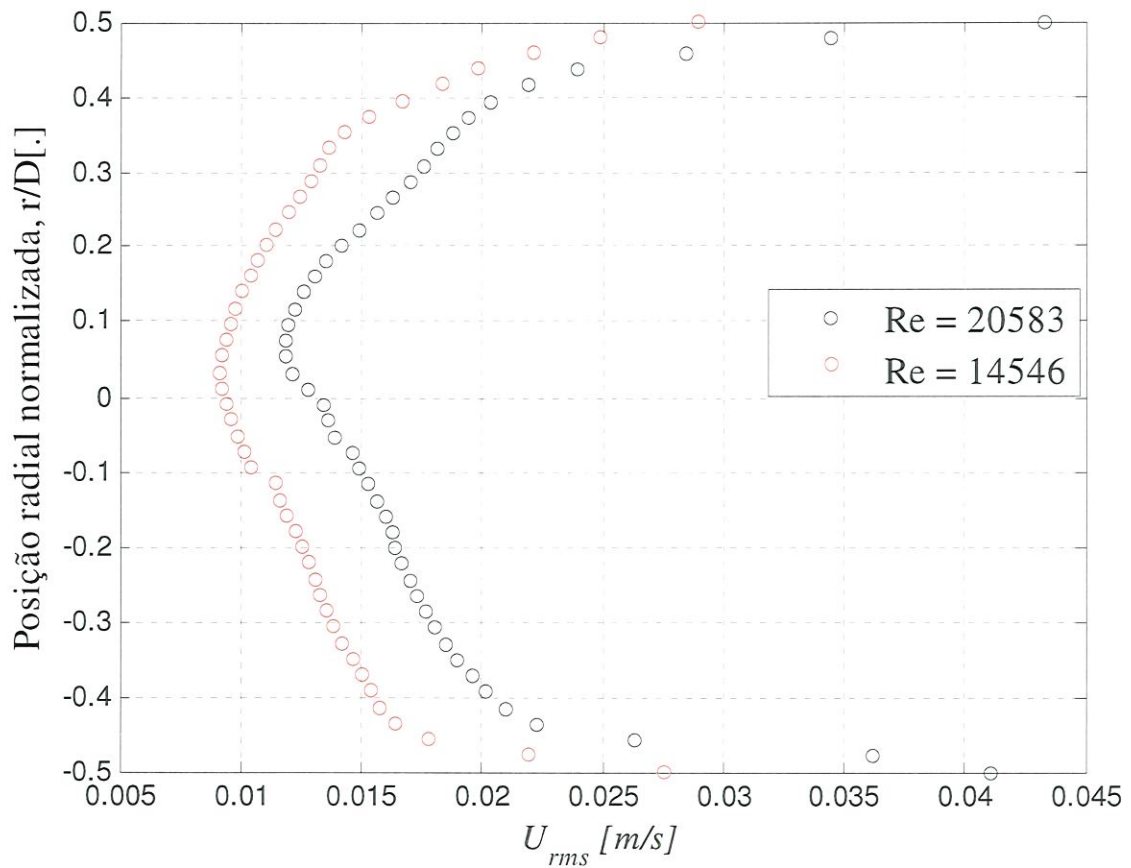


Figura 5.9. Raiz da velocidade média quadrática, U_{rms} para escoamentos turbulentos no duto anular.

As velocidades quadráticas médias U_{rms} e V_{rms} descrevem as flutuações da velocidade nas direções horizontal (axial) e vertical (radial), respectivamente.

5.2.5. Velocidades quadráticas médias V_{rms} ou flutuações da velocidade na direção vertical (radial) no duto anular

Na Figura 5.10, podemos ver as flutuações de velocidade radial, V_{rms} , definidas pela equação (5.8), que representam desvios ou flutuações na componente de velocidade radial, em comparação com a componente axial, em ordem inferior de 50%, 60% e 150%.

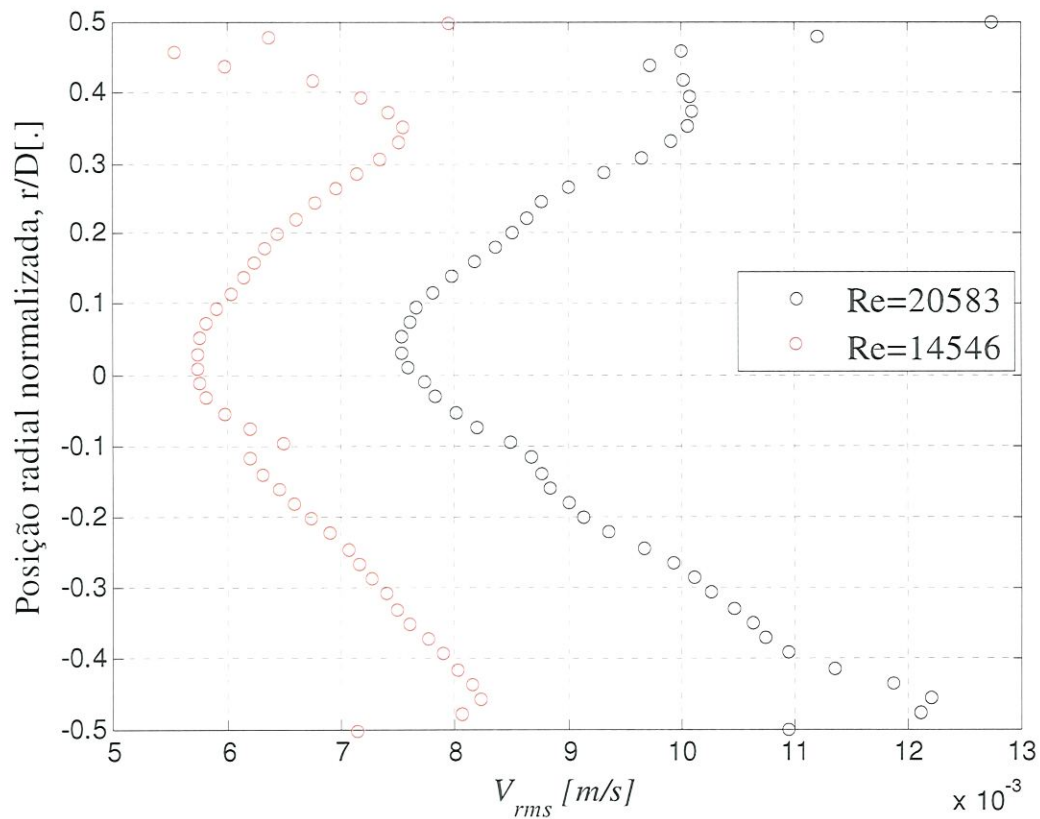


Figura 5.10. Raiz do valor quadrático médio para a velocidade radial, V_{rms} em escoamentos turbulentos no duto anular.

Para as flutuações das velocidades U_{rms} e V_{rms} são localizadas incoerências máximas na região próxima à parede (a uma distância de $\sim 1,5$ mm), devido à diferença dos índices de refração, produzindo reflexos e distorções das imagens, e à presença de gradientes de velocidade maiores.

5.2.6. Tensão de cisalhamento de Reynolds no duto anular

As tensões de cisalhamento de Reynolds, dadas pela equação (5.9), são apresentadas na Figura 5.11 para os escoamentos turbulentos, totalmente desenvolvidos e em estado estatisticamente estável no duto anular, mostrando as tensões máximas nas posições radiais próximas de 0,4 para um $Re = 20583$ e $Re = 14546$. Da Figura 5.11, pode-se ver que os picos na distribuição de tensão de Reynolds mostram a dependência do número de Reynolds, quanto maior número de Re , maior é o pico. Esta distribuição de tensão de cisalhamento é quase linear e

independente do escoamento, porque em ambos os casos a tensão de cisalhamento na parede equilibra a diferença de pressão imposta ao fluido.

Na região do centro $r/D=0$, do fluido, as tensões de cisalhamento viscosas são pequenas e, portanto, para a parede, a tensão de cisalhamento viscoso torna-se importante, esta observação é confirmada pelos trabalhos de (KUMARA et al., 2010a; ELSETH, 2001; TOONDER et al., 1997; MOSER et al., 1999; MEYER e WESTERWEEL, 2000; CHRISTENSEN, 2004; WESTERWEEL, 1993).

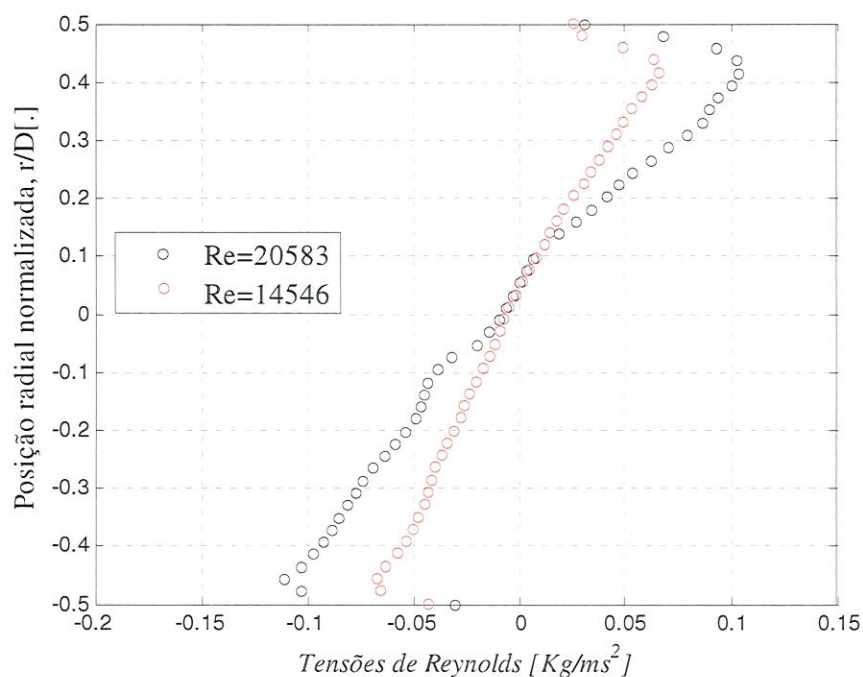


Figura 5.11. Tensões de cisalhamento de Reynolds para escoamentos turbulentos no duto anular.

5.3. Análise de turbulência em duto anular

É apresentada a análise mais detalhada do comportamento da turbulência no duto anular para uma inclinação de 5 e 2 graus com relação à horizontal, onde são analisadas as velocidades mínima mensurável perto da parede, com sua respectiva distância da parede (radial y), tendo como referência os seguintes autores, Potter (2012), Schlichting (1979), Westerweel, (1997), Westerweel (1994). Apresenta-se a velocidade do ponto máximo da tensão de cisalhamento de Reynolds, mostrando a região onde o PIV inicia a medição, tendo como referência a espessura da subcamada viscosa, camada de transição e camada logarítmica, mostradas nas Figuras 5.12 a

5.15. Ao final se apresentam todos os dados analisados com relação à velocidade no ponto mínimo medido pelo PIV, comparadas com a velocidade média do escoamento, Tabela 5.2 e 5.3

5.3.1. Tensão de cisalhamento de Reynolds e perfil de velocidade de escoamento turbulento em duto anular para um número de Reynolds de 8587, em 5 graus de inclinação

Na Figura 5.12 são plotados os dados experimentais da tensão de cisalhamento de Reynolds, segundo a equação (5.9), e o perfil de velocidade do PIV, pela equação (5.2), mostrando as velocidades máximas e a posição radial em *mm* neste ponto. Para escoamento turbulento no duto anular, as tensões e os perfis foram analisados próximo do tubo interno e externo. Nesta Figura 5.12 se analisam o ponto onde acontece a maior tensão de cisalhamento da parede do tubo interno e externo. Por exemplo, na Figura 5.12, apresenta-se um pico da tensão de cisalhamento de Reynolds de 0.024 Pa em 4.56 mm de distância com o tubo interno e -0.028 Pa em 5,48 mm com o tubo externo.

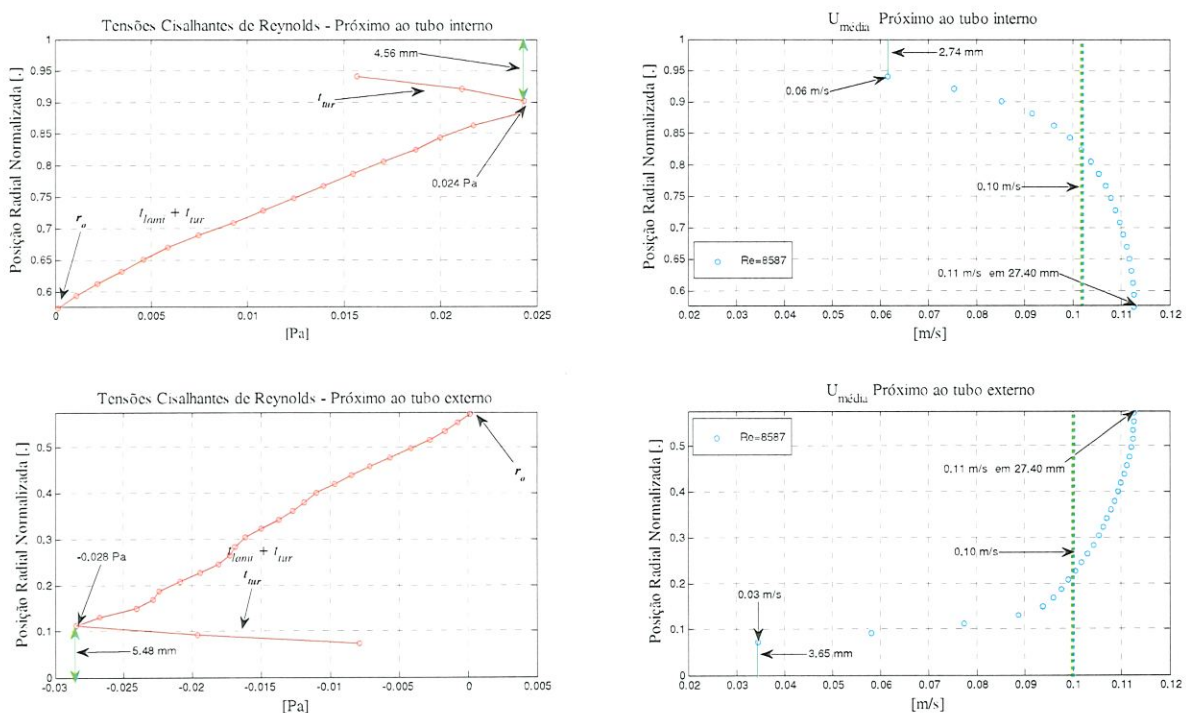


Figura 5.12. Distribuições da tensão de cisalhamento de Reynolds e perfil de velocidade de escoamento turbulento em duto anular, próximo ao tubo interno e externo para $Re = 8587$, com 5 graus de inclinação em relação à horizontal.

Na análise feita para a, Figura 5.12, sobre os perfis de velocidades, é fácil ver o ponto máximo da velocidade dos perfis mostrados, por exemplo, 0.11 m/s a uma distância do tubo externo de 27.40 mm. É claro ver uma região que vai de o centro da região anular marcado como r_o ao ponto máximo da tensão de cisalhamento, tanto para o tubo interno como externo marcada como $t_{lami} + t_{tur}$. Conhecer e analisar estas regiões resulta importante quando são feitas análises via PIV, permitindo saber quantos pontos experimentais são tomados nestas regiões.

5.3.2. Tensão de cisalhamento de Reynolds e perfil de velocidade de escoamento turbulento em duto anular para um número de Reynolds de 7106, em 2 graus de inclinação.

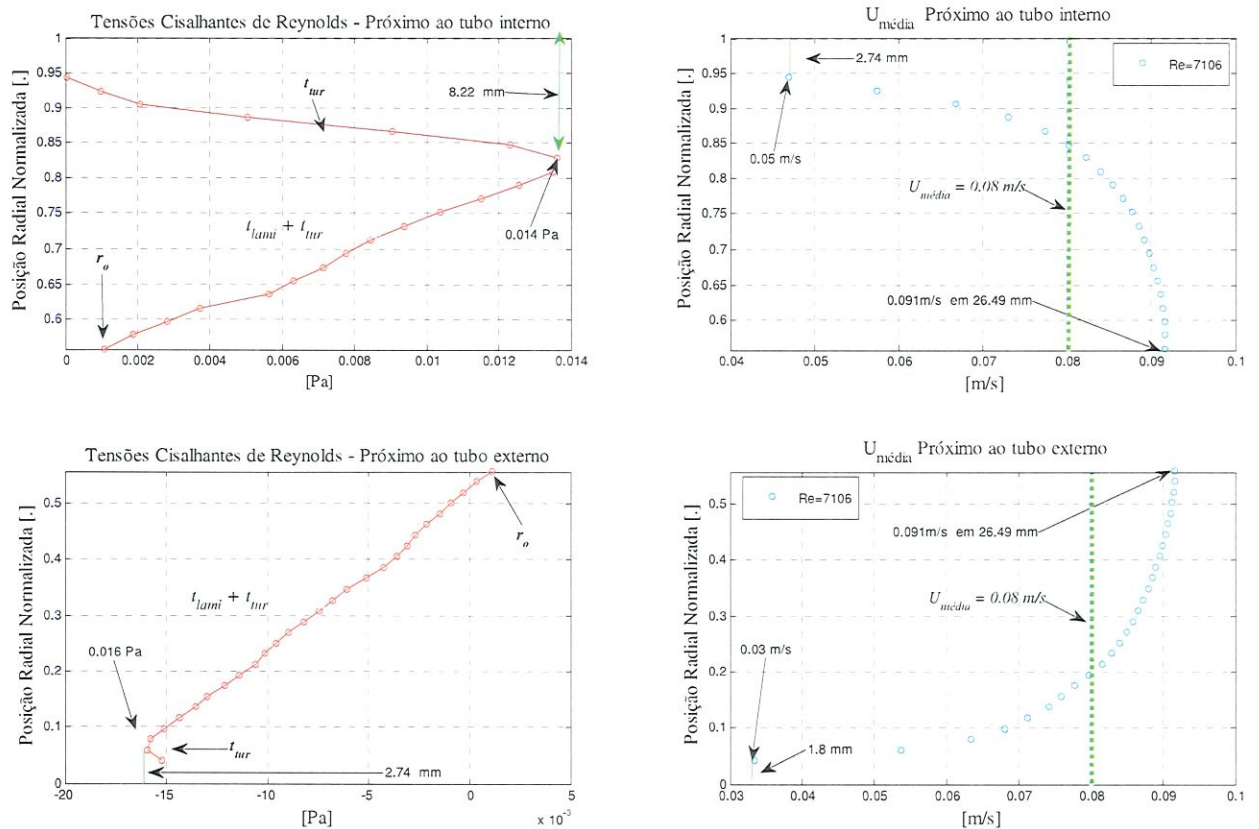


Figura 5.13 Distribuições da tensão de cisalhamento de Reynolds e perfil de velocidades de escoamento turbulento em duto anular, próximo ao tubo interno e externo para $Re = 7106$, com 2 graus de inclinação em relação à horizontal.

Na Figura 5.13, analogamente ao caso anterior, são plotados os dados experimentais da tensão de cisalhamento de Reynolds, segundo a equação (5.9), e o perfil de velocidade do PIV, pela equação (5.2), mostrando os pontos experimentais quase obtém com o PIV na região de tensão de cisalhamento turbulento t_{tur} e em $t_{lami}+t_{tur}$. A Figura 5.13 também mostra a velocidade máxima de 0,091 m/s a uma distância da parede de tubo externo de 26,49 mm com uma velocidade média de 0,08 m/s.

Para comparar as medidas médias dos perfis da velocidade experimentais com a "lei da parede", os resultados são mostrados em termos de U^+ versus Y^+ para o perfil interno (ou seja, a distribuição da velocidade entre a parede interna do tubo interno e a localização da velocidade máxima). Da mesma forma, os resultados são mostrados em termos de U^+ versus Y^+ para o perfil externo (isto é, entre a parede externa do tubo externo e a localização da velocidade máxima), ver Figura 5.14 e 5.15. As distribuições logarítmicas estabelecidas a partir dos dados de escoamentos de Nikuradse (constantes de 5.5 e 2.5), equação (5.14) e como sugeridas por Clauser (1956), com constantes de 4.9 e 2.44, equação (5.13) A espessura da subcamada viscosa pode ser avaliada usando a relação $U^+ = Y^+$. Deve-se de aclarar que esta análise da lei da parede está feita segundo os modelos para tubo, onde as tensões de cisalhamento são iguais para parede superior e inferior do tubo, devido à axissimetria. Como o caso aqui estudado é para duto anular onde as áreas do tubo interno e externo são diferentes, as tensões do tubo interno e externo também serão diferentes. Assim, nas Figuras 5.14 e 5.15 há certas discordâncias com o modelo da lei da parede comparado, como esperado.

$$\frac{U}{u_\tau} = 2.44 * (\ln Y^+) + 4.9 \quad (5.13)$$

$$\frac{U}{u_\tau} = 2.5 * (\ln Y^+) + 5.5 \quad (5.14)$$

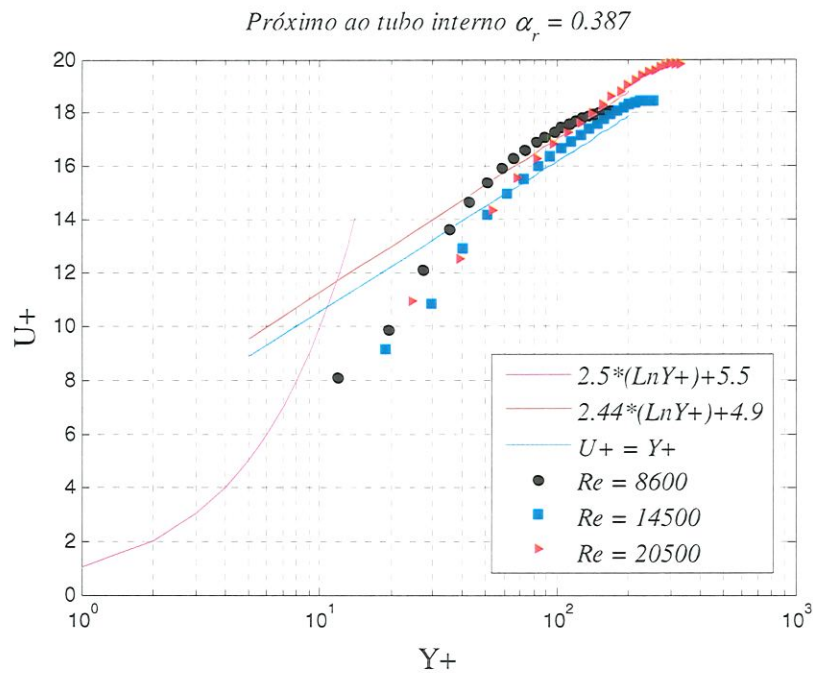


Figura 5.14 Perfis de velocidade adimensionais em função da posição radial adimensional U_+ , em escala logarítmica, para a camada limite em escoamento turbulento para parede do tubo interno com uma razão de raio $\alpha_r = 0.387$.

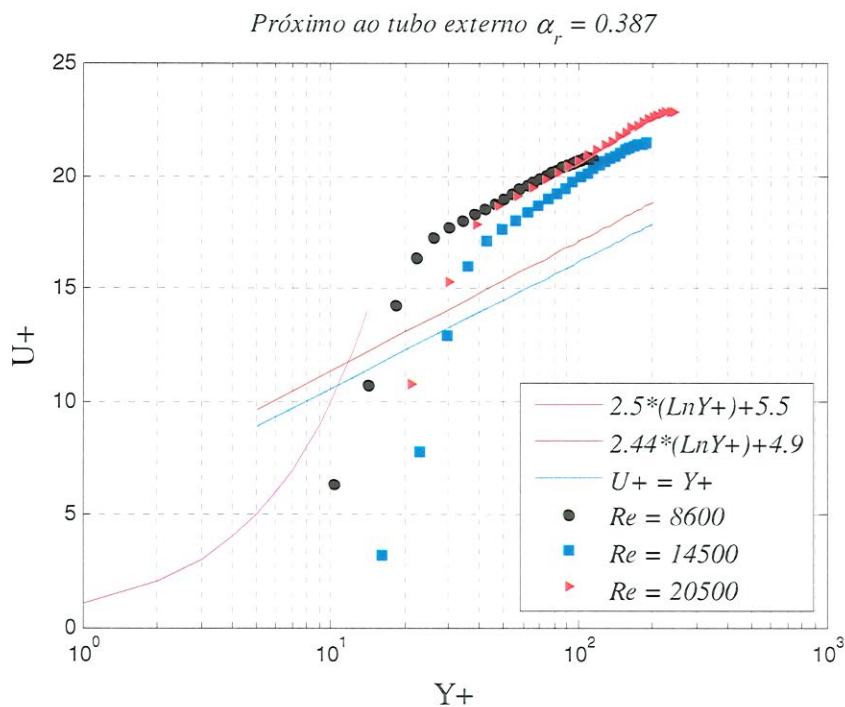


Figura 5.15. Perfis de velocidade adimensionais em função da posição radial adimensional U_+ , em escala logarítmica, para a camada limite em escoamento turbulento para a parede do tubo externo com uma razão de raio $\alpha_r = 0.0387$.

Um resultado interessante é a velocidade de parede com magnitude superior na parede do tubo interno Figura 5.15, em comparação com o observado em tubos. Isso pode ser explicado pela maior tensão cisalhante local em escoamento em duto anular. Com a análise da lei da parede se tem uma estimativa de onde ficam localizados os pontos com relação à subcamada viscosa, camada de transição e camada logarítmica. No caso das Figuras 5.14 e 5.15, a maioria dos pontos tomados estão localizados na camada de transição, $5 < Y^+ < 30$, e camada logarítmica $Y^+ > 30$. É difícil fazer medições de PIV na subcamada viscosa, devido a distúrbios ópticos perto da parede do tubo externo e interno.

As Tabelas 5.2 e 5.3 tem o resumo da análise feita da velocidade média com relação a velocidade mínima mensurável perto da parede do tubo externo e interno do duto anular, com suas respectivas distâncias em milímetros, coluna 6 das Figuras 5.12 e 5.13. Na coluna 5 se mostra a porcentagem que representa a velocidade mínima mensurável perto das paredes do tubo interno e externo com relação à velocidade média do escoamento. Também nestas tabelas, coluna 7, mostra-se a velocidade no ponto máximo da tensão de Reynolds.

Tabela 5.2. Análise da velocidade média, com relação à velocidade mínima mensurável perto da parede, próximo ao tubo interno.

<i>Inclinação</i>	<i>Número de Reynolds do escoamento</i>	<i>Velocidade mínima mensurável perto da parede tubo interno [m/s]</i>	<i>Velocidade média do escoamento [m/s]</i>	<i>Porcentagem da velocidade mínima mensurável com relação da velocidade média [%]</i>	<i>Distância da parede da velocidade mínima mensurável perto da parede [mm]</i>	<i>Velocidade no ponto máximo de Tensão de Reynolds [m/s]</i>
2 graus	7106	0.05	0.08	57.88	2.74	0.08
5 graus	8587	0.06	0.1	60.63	2.74	0.08

Tabela 5.3. Análise da velocidade média, com relação à velocidade mínima mensurável perto da parede próximo ao tubo externo.

<i>Inclinação</i>	<i>Número de Reynolds do escoamento</i>	<i>Velocidade mínima mensurável perto da parede tubo externo [m/s]</i>	<i>Velocidade média do escoamento [m/s]</i>	<i>Porcentagem da velocidade mínima mensurável com relação da velocidade média [%]</i>	<i>Distância da parede da velocidade mínima mensurável perto da parede [mm]</i>	<i>Velocidade no ponto máximo de Tensão de Reynolds [m/s]</i>
2 graus	7106	0.03	0.08	41.65	1.8	0.05
5 graus	8587	0.03	0.1	33.95	3.55	0.07

5.4. Escoamento bifásico ar-água para padrão pistonado no duto anular

Analisou-se através de PIV, o padrão de escoamento bifásico ar-água pistonado, para as condições dos escoamentos mencionados. Foram tiradas 3000 imagens das bolhas, onde cada bolha é representada por um quadro (*frame*). Cada bolha foi dividida em cinco posições, onde seu nariz foi definido como a primeira e a cauda como a última, ver Figura 5.16 e 517. Conhecendo o comprimento da bolha (L_b), as posições foram determinadas como frações de L_b : $1L_b/10$, $3L_b/10$, $5L_b/10$, $7L_b/10$ e $9L_b/10$. Ao final, os perfis médios de velocidade em cada posição foram tomados somando todos os perfis em cada posição e dividindo pelo total de bolhas, 3000.

Os escoamentos bifásicos, analisados com o sistema PIV, foram os seguintes:

$$a. \quad Q_w = 148 \text{ L/min e } Q_a = 38 \text{ L/min} - (j_w=0,154 \text{ m/s, } j_a=0,039 \text{ m/s});$$

$$b. \quad Q_w = 240 \text{ L/min e } Q_a = 36 \text{ L/min} - (j_w=0,249 \text{ m/s, } j_a=0,037 \text{ m/s}).$$

Neste capítulo são apresentados dois escoamentos, no total foram analisados seis escoamentos, os quatro restantes com características similares, cujas figuras são apresentadas no anexo do texto apêndice B.

Nas Figuras 5.16 e 517, são mostradas as fotografias das bolhas que atravessam a seção de visualização na parte superior e perfis de velocidade axial médios no plano vertical diametral, na parte inferior do duto anular, para diferentes velocidades superficiais, onde se podem ver os perfis, $U_{média}$, em cada posição do comprimento de L_b . As bolhas de ar alongadas foram observadas no lado superior do duto anular, seguidas por pistões de água em que bolhas dispersas podiam ser observadas, Figuras 5.16 e 517.

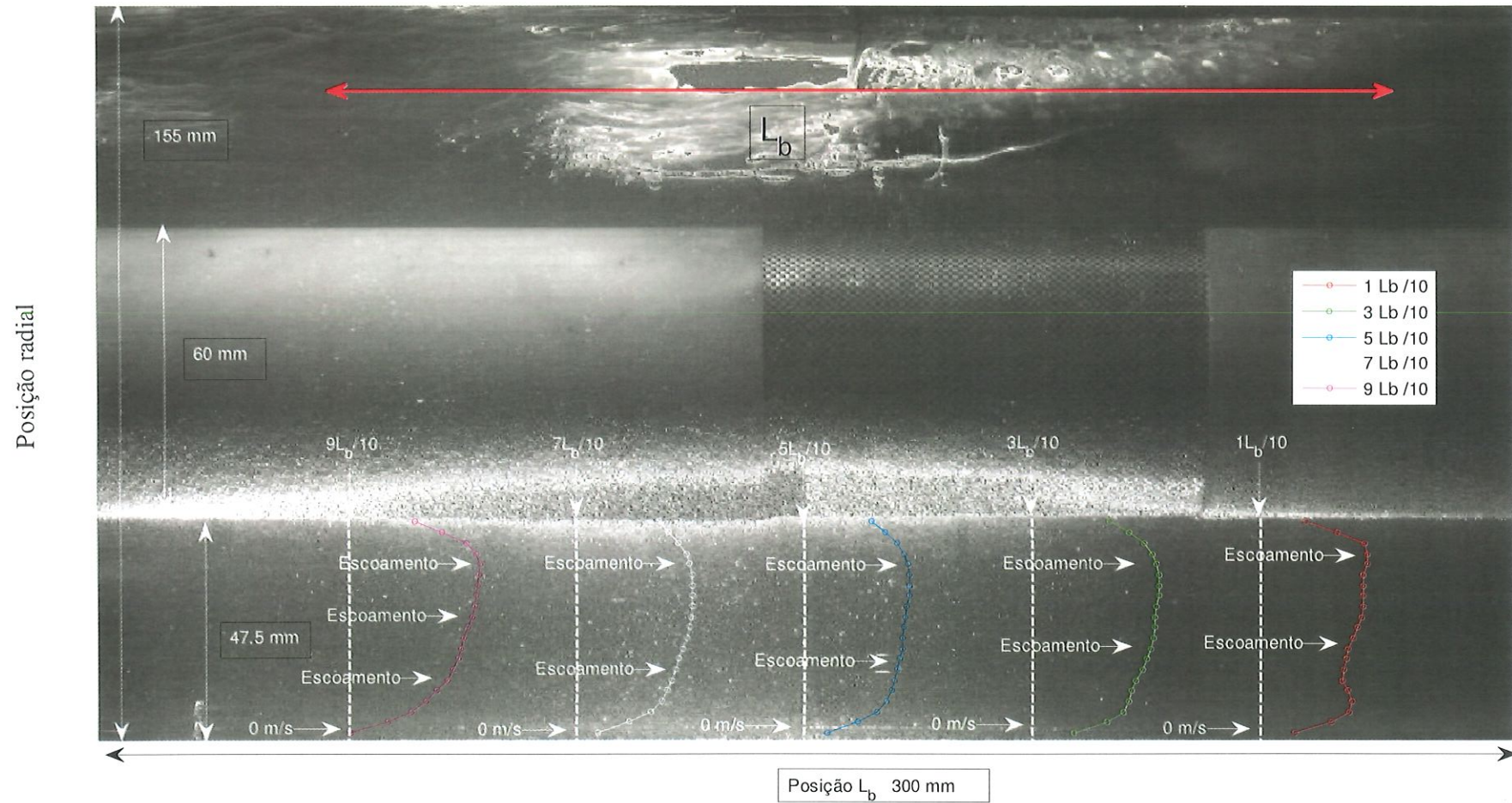


Figura 5.17. Bolha que atravessa a seção de visualização na parte superior e perfis de velocidade axial média no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular em diferentes posições em relação ao nariz de bolha para $j_w=0,249 \text{ m/s}$, $j_a=0,037 \text{ m/s}$.

5.4.1. Perfis da velocidade média em padrão pistonado no duto anular

Os perfis da velocidade foram calculados utilizando a equação 5.15 e foram plotados como ($U_{mean\ profile}$) nas Figuras 5.16 e 5.17:

$$U_{mean\ profile, PL_b/10} = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} u_i \quad (5.15)$$

onde: N_f é o número de quadros, 3000, e u_i é o perfil de velocidade do PIV para cada quadro, equivalente a um vetor de coluna $N_p \times 1$, representado pela equação (5.18), obtidos com PIV para cada quadro em cada posição $PL_b / 10$.

O campo de velocidades é representado por uma matriz de $n \times m$ (21×200), que é equivalente a um frame, onde m representa as colunas e n as linhas. Uma vez que dividimos a bolha em 5 posições PL_b , apenas 5 vetores de colunas ($N_p \times 1$) foram analisados. N_p é igual ao número de elementos neste vetor, ou seja, número de velocidades locais instantâneas que o formam. A velocidade axial média do perfil de velocidade PIV foi tomada para cada um dos 3000 quadros, onde cada quadro representa uma bolha, da seguinte forma:

$$U^*_{i, PL_b/10} = \frac{1}{N_p} \sum_{j=1}^{N_p=21} u^*_{i,j} \quad i = 1, 2, 3 \dots 3000 \quad (5.16)$$

Levando em consideração que $U^*_{i, PL_b/10}$ é o valor médio do i – éximo perfil de velocidade instantânea, u_i , isto é, um escalar e $u^*_{i,j}$ é uma velocidade instantânea local, j – éximo ponto do mesmo vetor, u_i é um vetor. As equações (5.17) e (5.18), mostram como trabalhamos com esses valores. $PL_b / 10$ representa as posições onde os vetores foram retirados de ($P = 1, 3, 5, 7, 9$), N_p é o número de velocidades locais instantâneas do vetor da coluna, $N_p = 21$. Em outras palavras, $U^*_{i, PL_b/10}$ é o valor médio do perfil de velocidade instantânea abaixo da i – éxima bolha na posição $PL_b / 10$.

$$U^*_{PL_b/10} = \begin{bmatrix} U^*_{1,PL_b/10} \\ U^*_{2,PL_b/10} \\ \vdots \\ U^*_{i,PL_b/10} \\ \vdots \\ U^*_{3000,PL_b/10} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$u_i = \begin{bmatrix} u^*_{i,1} \\ u^*_{i,2} \\ \vdots \\ u^*_{i,j} \\ \vdots \\ u^*_{i,Np} \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3 \dots 3000. \quad (5.18)$$

Na equação (5.16) dá-se o i – ésimo ponto da distribuição gaussiana das Figuras 5.18 e 519. Para obter a distribuição Gaussiana total para uma posição $PL_b / 10$, a equação (5.16) é aplicada para cada frame, neste caso 3000. Cada valor obtido pelo processo é salvo em outro vetor, a equação (5.17), e a distribuição deste vetor é traçada nas Figuras 5.18 e 519.

As equações (5.15) e (5.16) são semelhantes, mas representam duas coisas diferentes: enquanto a equação (5.16) é aplicada 3000 vezes, dando 3000 escalares representando os valores médios de cada um dos 3000 perfis de velocidade, que são armazenados em um vetor (equação (5.17)), através da equação (5.15) é obtido um perfil de velocidade médio. Se calcularmos a média dos 3000 valores dados pela Equação (5.16) (em outras palavras, média do vetor dado pela Equação (5.17)), o resultado é o mesmo que se tivéssemos calculado a média do perfil de velocidade médio dado pela Equação (5.15).

5.4.2. Funções de densidade de probabilidade PDF da velocidade axial média.

As velocidades médias relacionadas aos perfis de velocidade axial média nas Figuras 5.16 e 517 correspondem à média das distribuições Gaussianas (PDFs), Figuras 5.18 e 519.

Durante o escoamento pistonado, os perfis de velocidade média foram medidos no lado inferior do duto anular sobre o plano vertical diametral em cinco posições diferentes da bolha em relação ao seu nariz, indo do nariz à cauda. Pode-se ver nas Figuras 5.18 e 519 as funções de densidade de probabilidade (PDF) das velocidades axiais médias, $U^*_{i,PL_b/10}$. Todos os

PDFs das velocidades axiais médias mostraram distribuições que se assemelham a uma distribuição gaussiana, Figuras 5.18 e 5.19.

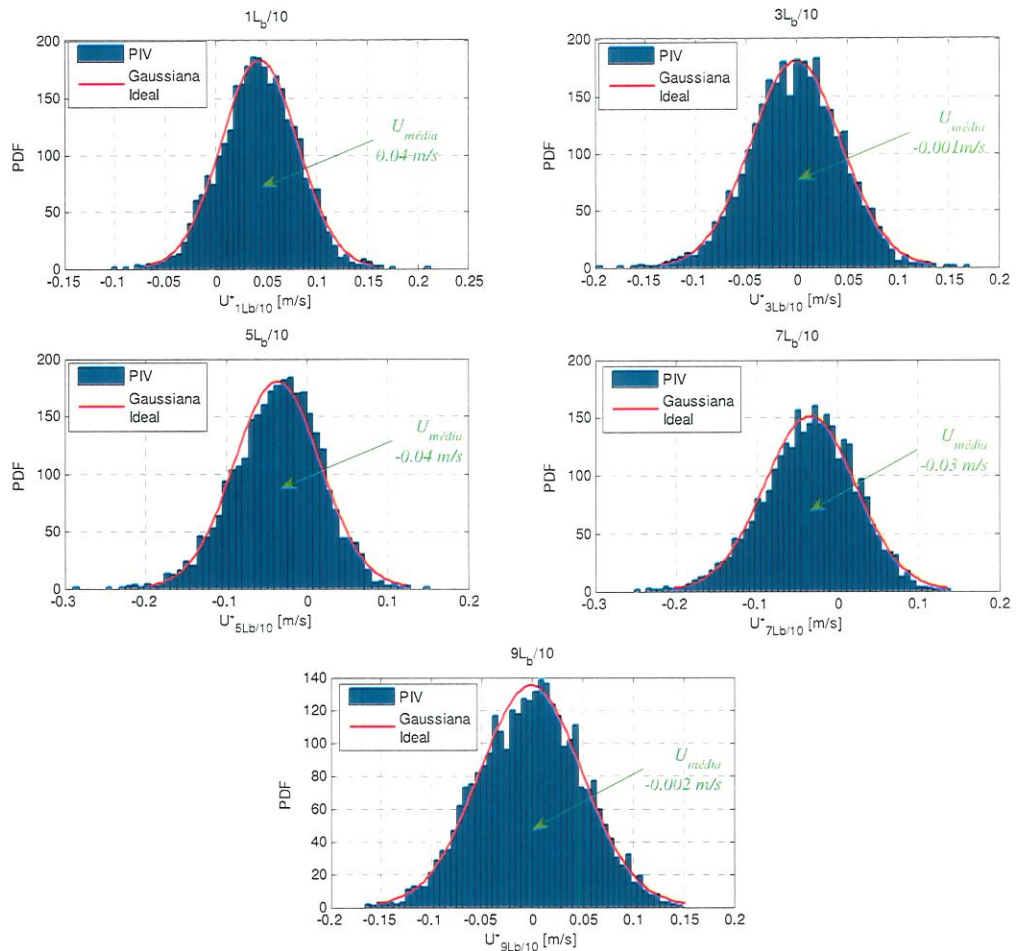


Figura 5.18. PDF de U_{mean} em várias posições L_b da bolha para $j_w=0,154 \text{ m/s}$, $j_a=0,039 \text{ m/s}$.

Na Figura 5.16, as velocidades superficiais foram de $j_w=0,154 \text{ m/s}$, $j_a=0,039 \text{ m/s}$. A velocidade média na Figura 5.18 corresponde à média da Gaussiana da Figura 5.16, por exemplo: na posição $5L_b/10$ a velocidade média axial da Gaussiana e do perfil são as mesmas, $-0,04 \text{ m/s}$.

O PDF da Figura 5.18 mostra boa concentração em torno da velocidade média. Da Figura 5.20, as mudanças na velocidade podem ser vistas mais claramente. Os perfis têm diferentes formas nas diferentes posições da bolha, mostrando que a velocidade diminui de

0.04 m/s no nariz ($1L_b/10$), a -0.04 m/s no meio, $5L_b/10$, e, em seguida, aumenta a -0,002 m/s na cauda ($9L_b/10$), Figura 5.20.

No PDF da Figura 5.19 no perfil de velocidades para o escoamento do líquido abaixo da bolha, para as velocidades superficiais de $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,037$ m/s tem só valores positivos, com um máximo no nariz da bolha ($1L_b/10$ de 0.13 m/s) e um mínimo no meio ($5L_b/10$) de 0.09 m/s, em comparação com o PDF da Figura 5.18 é apreciado que algumas médias são negativas.

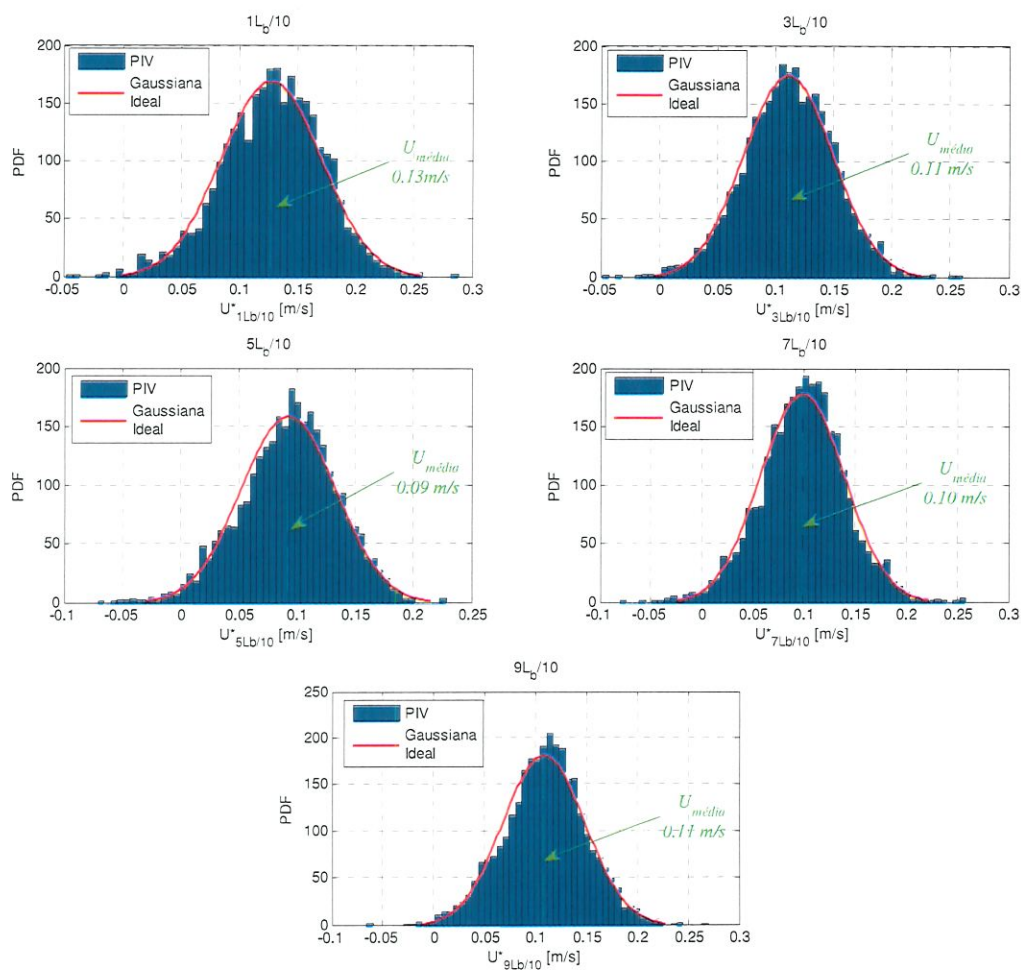


Figura 5.19. PDF de U_{mean} em várias posições L_b da bolha para $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,037$ m/s.

Nas Figura 5.20 e 5.21 se mostra a grande diferença que existe entre os dois escoamentos analisados, na Figura 5.20 os perfis médios de velocidade tem valores negativos em quase todas as posições a exceção do nariz $1L_b/10$, enquanto que os perfis da Figura 5.21

apresentam valores positivos em suas cinco posições. Por exemplo, na posição $1L_b/10$ o perfil da velocidade média da Figura 5.20, representa 33% da velocidade média da Figura 5.21, e 39% com relação a sua velocidade máxima.

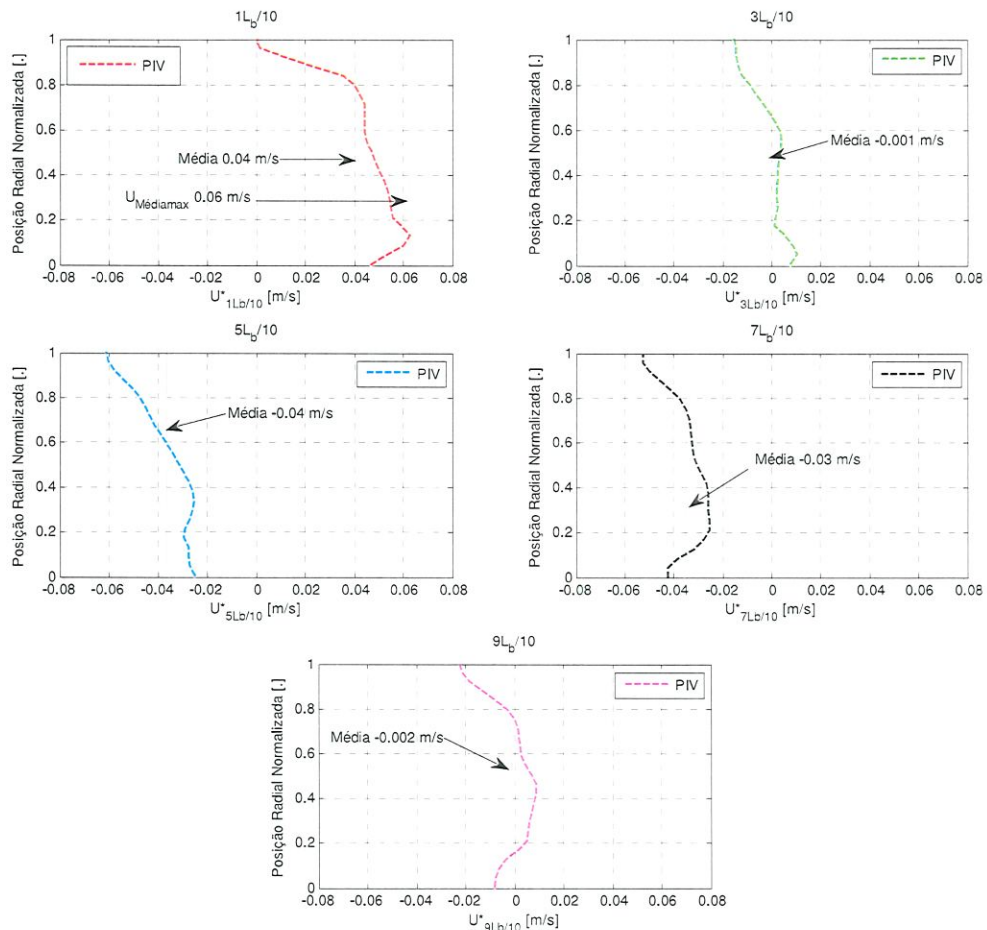


Figura 5.20. Perfil de velocidade axial médio em diferentes posições L_b da bolha para $j_w=0,154$ m/s, $j_a=0,039$ m/s.

A diferença que existe nos perfis da Figura 5.20 e 5.21 dos escoamentos analisados é resultado do efeito da a passagem da bolha na parte superior do duto, este efeito do perfil positivo ou negativo deve ser causado pelo tamanho e comprimento da bolha, concluindo que para maior vazão de água os perfis na parte inferior do duto são positivos, enquanto que para vazões baixas o comprimento e tamanho da bolha aumenta, portanto se apresenta escoamento com perfis negativos.

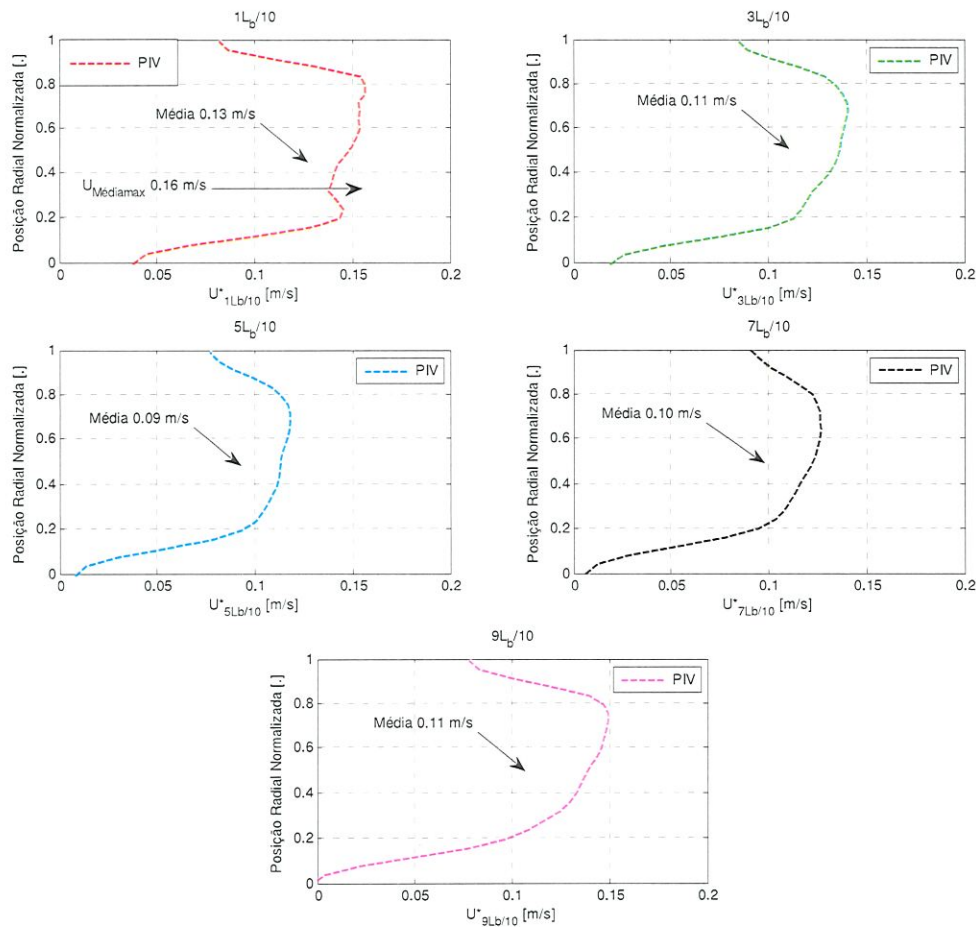


Figura 5.21. Perfil de velocidade média axial em diferentes posições L_b da bolha para $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,037$ m/s.

5.4.3. Tensões de cisalhamento de Reynolds

As tensões de cisalhamento de Reynolds, Figura 5.22 e 5.23, foram calculadas pela equação (5.9) de acordo com (KUMARA et al., 2010; ELSETH, 2001; TOONDER et al., 1997; WESTERWEEL et al., 1996; PEIXINHO et al., 2005; MOSER et al., 1999).

Nas Figuras 5.22 e 5.23, os perfis de tensão de cisalhamento de Reynolds resultam da turbulência perto da parede e do movimento da bolha. A turbulência na região perto da parede na Figura 5.22 produz um pico no perfil de tensão axial de $\sim -0,23$ kg/ms² localizado na posição radial de $r + \sim 0,81$, para a posição da bolha de $(1L_b/10)$. No entanto, uma tensão de cisalhamento de Reynolds negativa está presente no meio da bolha e perto da parede de \sim

0.65 em $r \sim 0,04$. Nota-se, similarmente, que a maior tensão de Reynolds é relativa à velocidade mais alta, e que ocorrem nas posições $1L_b/10$ e $9L_b/10$. Figuras 5.22 e 5.23, que pode ser diretamente atribuído ao aumento da intensidade de turbulência gerado pela passagem da bolha na parte superior do duto.

Esta distribuição de tensão de cisalhamento, Figuras 5.22 e 5.23, não é linear. Diferentemente ao visto em escoamento turbulento analisado anteriormente, devido ao grande impacto causado pela passagem da bolha na parte superior do duto, gerando gradientes normais à parede e tensões de cisalhamento na parte inferior abaixo da bolha, ainda não estudados ou reportados na literatura.

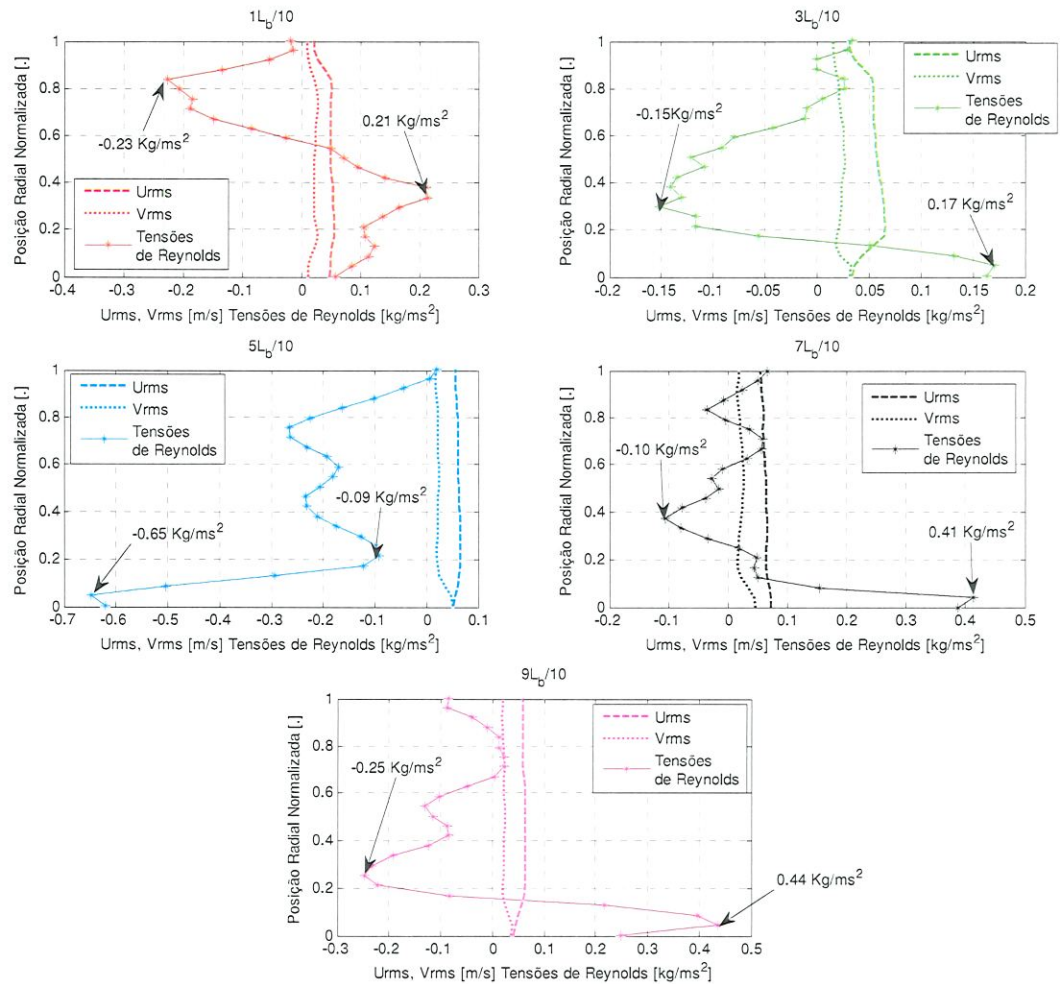


Figura 5.22. Estatísticas de turbulência, U_{rms} , V_{rms} e tensão de cisalhamento de Reynolds para $j_w=0,154 \text{ m/s}$, $j_a=0,039 \text{ m/s}$.

Figura 5.23, mostra altas flutuações perto da parede. Quando a velocidade superficial da água é aumentada de $j_w=0,154$ m/s para $j_w=0,249$ m/s, a tensão de Reynolds também aumenta, especialmente na posição $1L_b/10$ com um valor máximo de -0.38 Kg/ms², e $3l_b/10$ com 0.32 Kg/ms², perto da parede do tubo interno, Figura 5.23.

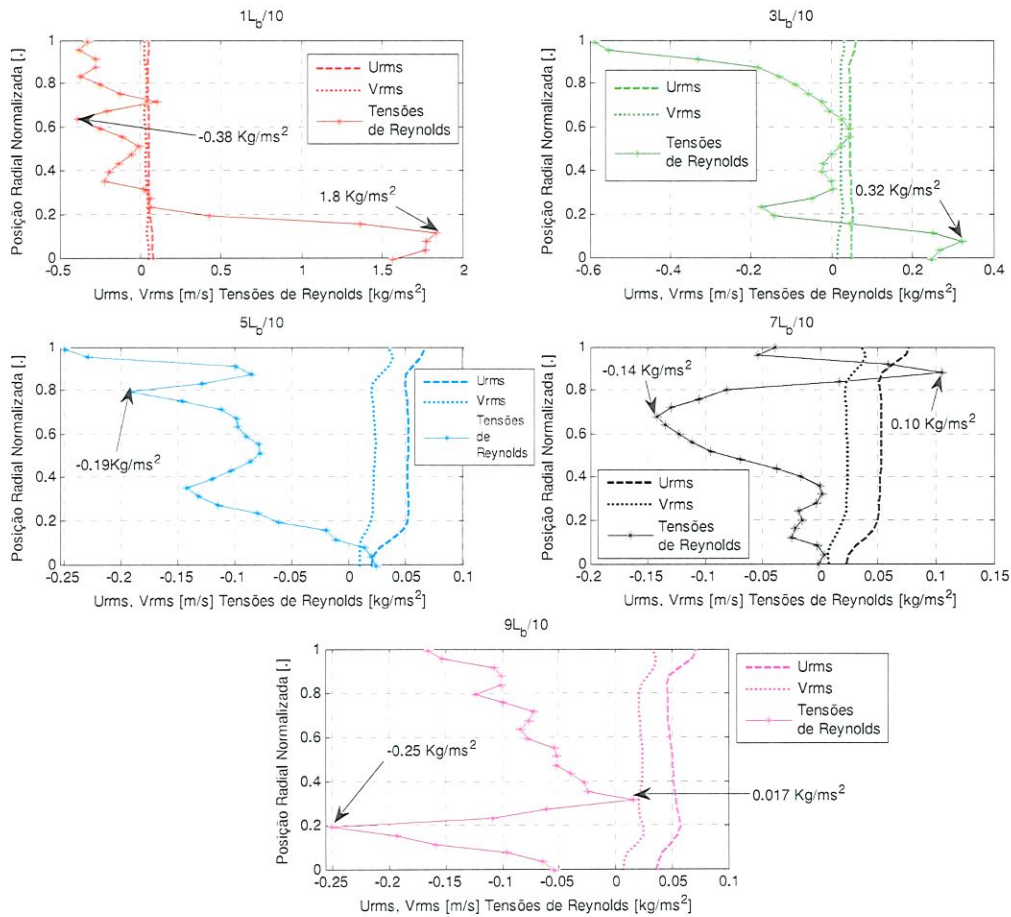


Figura 5.23. Estatísticas de turbulência U_{rms} , V_{rms} e tensão de cisalhamento de Reynolds para $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,037$ m/s.

5.5. Processamento e redução de dados AWMS

É apresentada a análise da frequência de passagem de bolhas e fração de vazio no escoamento bifásico ar-água para o padrão pistonado, onde é usada a transformada rápida de Fourier (FFT) para calcular a densidade espectral de potência (PSD), obtida a partir do sinal do tempo da fração de vazio medida pela AWMS. A velocidade média da bolha é calculada

usando a gravação de vídeo da câmera de alta velocidade, que foi comparada com os dados de velocidade obtidos por velocimetria por imagem de partículas (PIV) juntamente com a AWMS.

Foram gravados 3000 frames pela AWMS a uma taxa de 100 fps (quadros/s), totalizando um período de gravação de 30 segundos. Cada frame representa um instante de tempo em que foram medidas permissividade e condutividade do fluido em todos os pontos de cruzamento dos fios transmissores e receptores, para a geração da imagem da seção transversal. Para a imagem lateral, todos os frames da seção transversal são tomados juntos, em uma matriz tridimensional. Imaginando que a matriz está em um sistema de coordenadas XYZ , os eixos X e Y contêm a seção transversal e o eixo Z o sentido do escoamento. Neste, são empilhados os 3000 quadros, cada um contendo um plano XY . A imagem lateral é a coluna central das medidas da AWMS, ou seja, vetores contendo todos os pontos em Y para o X central.

Para cada um dos escoamentos, os dados foram processados segundo 12 modelos de permissividade (e condutividade) diferentes, Tabela 3.1. Os resultados obtidos pela AWMS para fração de vazio do escoamento foram então comparados com os obtidos por uma válvula solenoide de fechamento rápido por meio de um gráfico. Um modelo é bom se o ponto estiver próximo à reta traçada com inclinação de 45° , Figura 5.24. Deve-se ressaltar que um modelo pode ter resultados bons para um escoamento, mas ruins para outros.

Na Figura 5.24 são mostrados os resultados para uma velocidade superficial de água de 0,092 m/s e 5 diferentes velocidades superficiais de ar, variando de 0,042 m/s a 0,055 m/s (para estes escoamentos não foi possível a análise do PIV, pois a bolha tinha comprimento maior que a seção de visualização). O modelo de Bruggeman 1 (Tabela 3.1), Brug1 na Figura 5.24, apresentou os melhores resultados. Porém, observa-se que para a segunda velocidade de ar, que representa a segunda menor fração de vazio, o modelo de séries (quadrado) também apresentou uma fração de vazio bem próxima da reta ideal (o quadrado e o triângulo estão quase sobrepostos), fato que não é repetido para as demais vazões de ar. Na ordem apresentada na Figura 5.24 os modelos: Paralelo; Bruggeman 1, 2 e 3; Bruggeman-Maxwell-Wagner (BMW); Séries; Hannai; Lei de Potência; Looyenga; Birchak; Logarítimo e Maxwell-Garnet, Tabela 3.1.

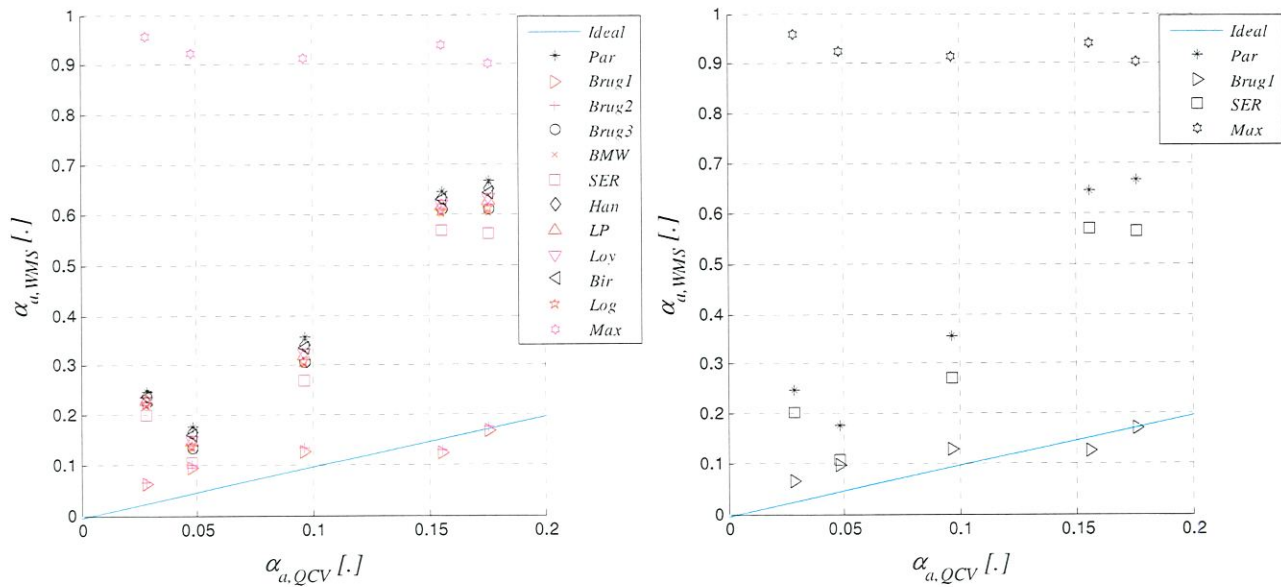


Figura 5.24. Gráfico comparando os 12 modelos implementados, para escoamento com $j_w = 0,092 \text{ m/s}$ e $j_a = 0,055 \text{ m/s}$. Ao lado direito, quatro modelos escolhidos.

No apêndice C o mesmo tipo de gráfico foi plotado para os escoamentos que se tinha dados do PIV, mostrando quatro modelos e novamente, o modelo de Bruggeman 1.

5.5.1. Fração de vazio medida pela AWMS

A fração de vazio medida pela AWMS, utilizada na Figura 5.24, acima, é a média obtida em todo o tempo de gravação dos dados (30 segundos), a partir do sinal temporal, Figura 5.25. Para obter o valor médio da fração de vazio para todo o conjunto de dados obtidos, a equação (5.19) e equação (5.20) foram aplicadas aos dados mostrados na Figura 5.25 e figuras do apêndice C.

$$\hat{\alpha}(k) = \sum_{i=1}^{16} \sum_{j=1}^{16} w(i,j) \alpha(i,j,k) \quad k = 1, 2, 3 \dots \text{número de frames} \quad (5.19)$$

onde $\hat{\alpha}(k)$ é a fração de vazio média sobre uma seção transversal, $w(i,j)$ são os coeficientes de peso, de posição da área (i,j) sobre a área da seção transversal, conforme Rodriguez et al., (2015), Velasco-Peña e Rodriguez (2015) and Damsohn e Prasser (2009b)). O procedimento de ponderação é particularmente importante em posições mais próximas das paredes, onde as

medições são realizadas numa área menor do que aquelas feitas longe da parede. $\alpha(i, j, k)$ é a medida para o k – ésimo frame na posição (i, j) . Finalmente,

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{k_{max}} \sum_{k=1}^{k_{max}} \hat{\alpha}(k) \quad (5.20)$$

onde $\bar{\alpha}$ é a fração de vazio volumétrica média ao longo do tempo e espaço, k_{max} é o número de quadros, neste caso 3000 e $\hat{\alpha}(k)$ são os valores obtidos da equação (5.19).

Dispondo os dados em função do tempo, com o histograma mostrando a distribuição de frações de vazio, em um escoamento em que o PIV não foi aplicado, Figura 5.25, tem-se:

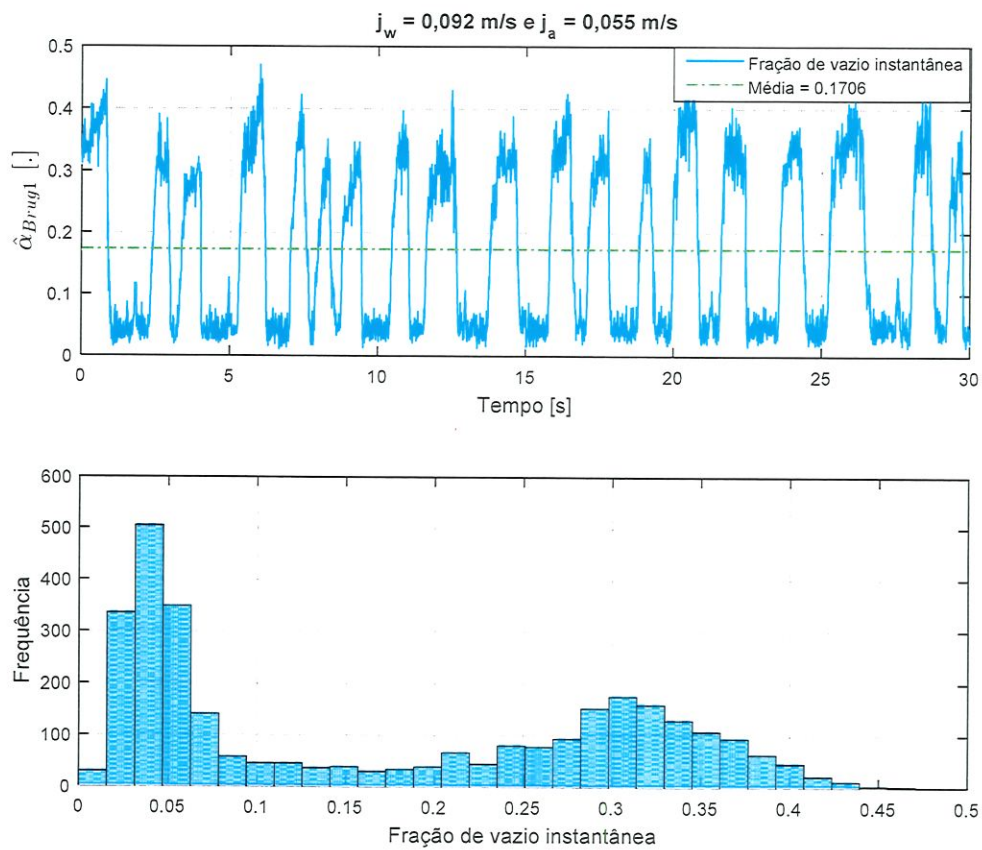


Figura 5.25. Fração de vazio média numa seção transversal em função do tempo; abaixo, histograma mostrando a distribuição de frações de vazio para $j_w = 0,092 \text{ m/s}$ e $j_a = 0,55 \text{ m/s}$

A Figura 5.25, foi gerado também para os escoamentos em que o PIV foi utilizado, estes estão presentes no apêndice C. Nota-se que:

A fração de vazio aumenta conforme a velocidade superficial do ar aumenta, mas ela depende também da velocidade superficial da água, visto que o ar é um fluido compressível e pode sofrer variações de densidade dentro do duto em decorrência da mudança no gradiente de pressão.

Para velocidades superficiais de ar próximas, espera-se que para uma velocidade superficial de água maior a injeção de ar no escoamento gere mais bolhas, porém, que elas tenham menor comprimento (pico do sinal temporal com duração menor). Esperava-se uma fração de vazio maior para um escoamento com menor velocidade superficial de água, isso foi observado, comparando a Figura 5.25 com as apresentadas no apêndice C. Deve-se ressaltar que para escoamentos em que a fração de vazio média é baixa (em torno de 0,06), as medidas da AWMS têm um desvio maior em relação ao que foi medido pela válvula de fechamento rápido

Para j_a altas, (i) em j_w baixas (0,092 m/s na Figura 5.25) o histograma passa a ter dois picos; o novo pico, de maior fração de vazio, é explicado pelo maior tamanho das bolhas de ar (os picos de fração de vazio no sinal temporal tem duração maior); (ii) em j_w altas (figuras presentes no apêndice C de fração de vazio) o histograma não evidencia um segundo pico, isso é explicado pela duração curta dos picos de fração de vazio instantânea, assim ela é menos significativa dentro de todas as amostras, mesmo existindo mais bolhas que no caso da Figura 5.25.

5.5.2. Caracterização de escoamento pistonado no duto anular, usando câmera de Alta velocidade, AWMS e PIV.

5.5.2.1. Sincronismo: PIV, AWMS e câmera de alta velocidade.

Após o processamento dos dados do PIV e da AWMS, eles foram sincronizados juntamente com os da câmera de alta velocidade para obtenção de informações sobre a frequência de passagem das bolhas. Os resultados mostram os perfis de velocidade em diferentes posições, abaixo da bolha e do pistão no duto anular. Tomografias das seções transversal e lateral do escoamento foram tomadas com a AWMS. As imagens dão um

conhecimento qualitativo do fenômeno do escoamento durante a passagem da bolha e do pistão.

Nas Figura 5.26 e Figura 5.27, tomografias axiais e transversais do trânsito de uma bolha no padrão pistonado água-ar no duto anular são observadas. O escoamento do líquido tem seu sentido trocado durante a passagem da bolha, efeito que vai diminuindo conforme é aumentada a vazão da água (ou diminuída a de ar), até que, não ocorra mais o escoamento reverso (*'backflow'*). A água é representada com a cor azul e o ar com a cor verde. As tomografias foram tomadas pela AWMS a 100 fps usando o modelo Bruggeman, e sincronizadas com os perfis de velocidade do PIV em cada posição da bolha ($1L_b/10$, $3L_b/10$, $5L_b/10$, $7L_b/10$ e $9L_b/10$).

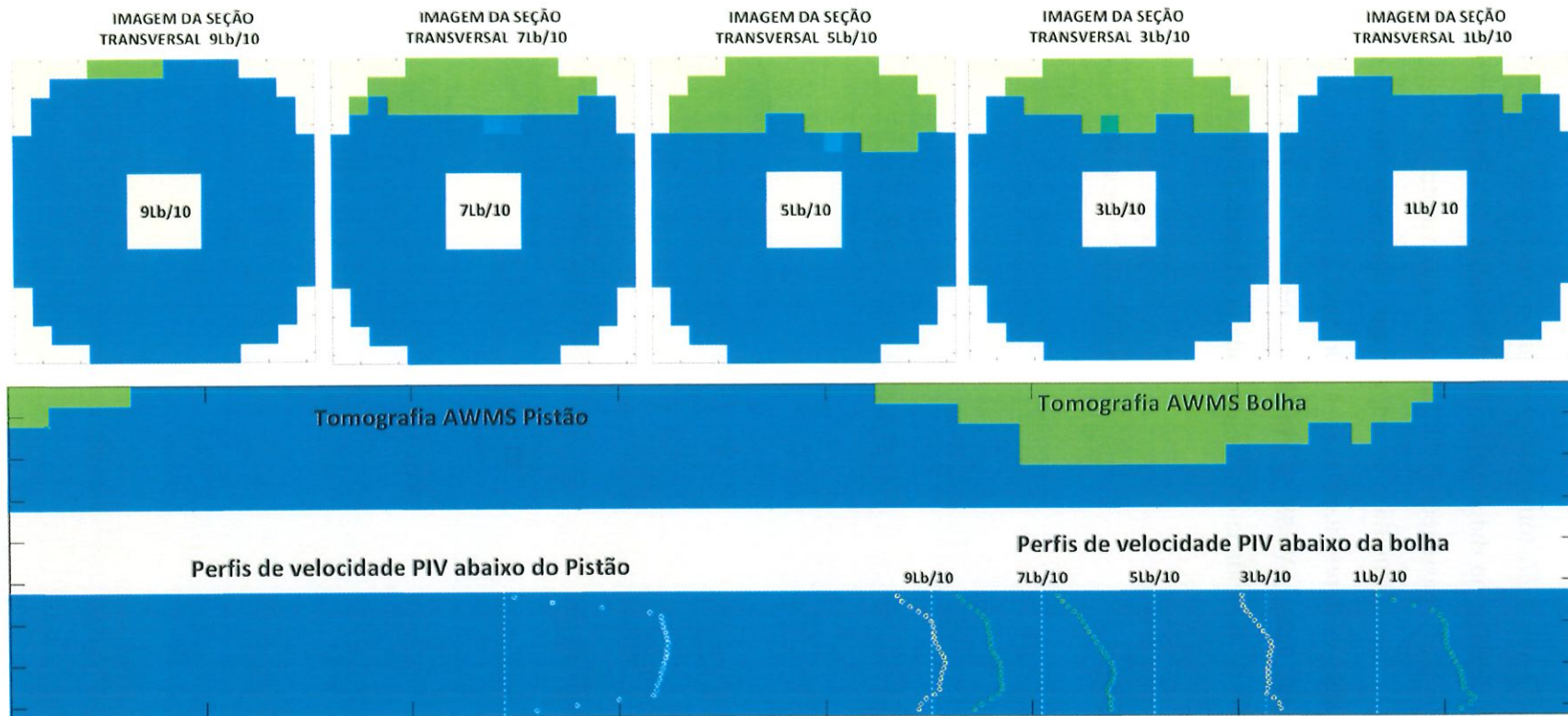


Figura 5.26. Sincronismo PIV e AWMS, escoamento $Q_w = 148 \text{ L/min}$ e $Q_a = 38 \text{ L/min}$ - ($j_w=0,154 \text{ m/s}$, $j_a=0,039 \text{ m/s}$).

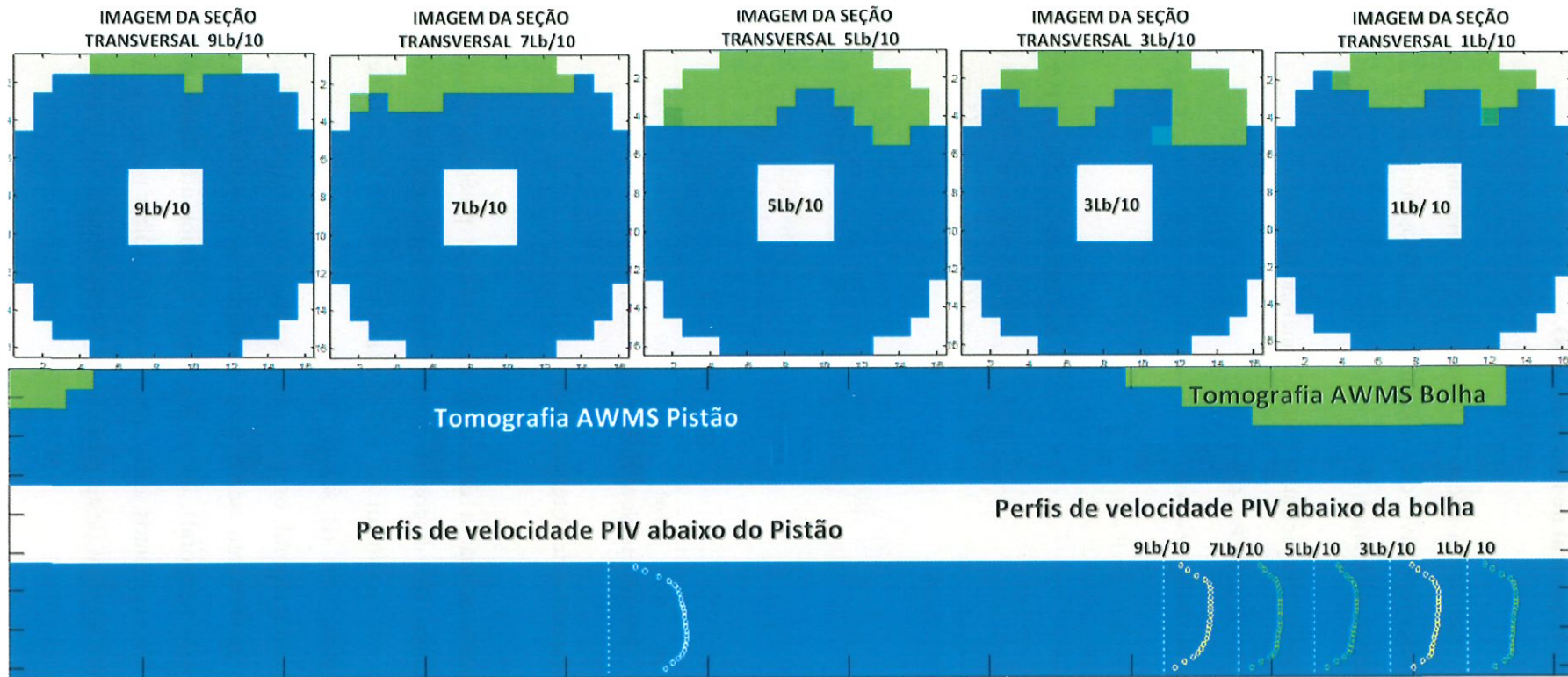


Figura 5.27. Sincronismo PIV e AWMS, escoamento, $Q_w = 240 \text{ L/min}$ e $Q_a = 32 \text{ L/min}$ ($j_w = 0,249 \text{ m/s}$, $j_a = 0,033 \text{ m/s}$).

5.5.3. Distribuição Espectral de Potência, PSD.

A fração de vazio instantânea é correlacionada a um sinal no tempo medido pela AWMS. Devido ao seu caráter repetitivo, eles podem ser estudados por meio de distribuições espectrais de potência, obtendo a Figura 5.28:

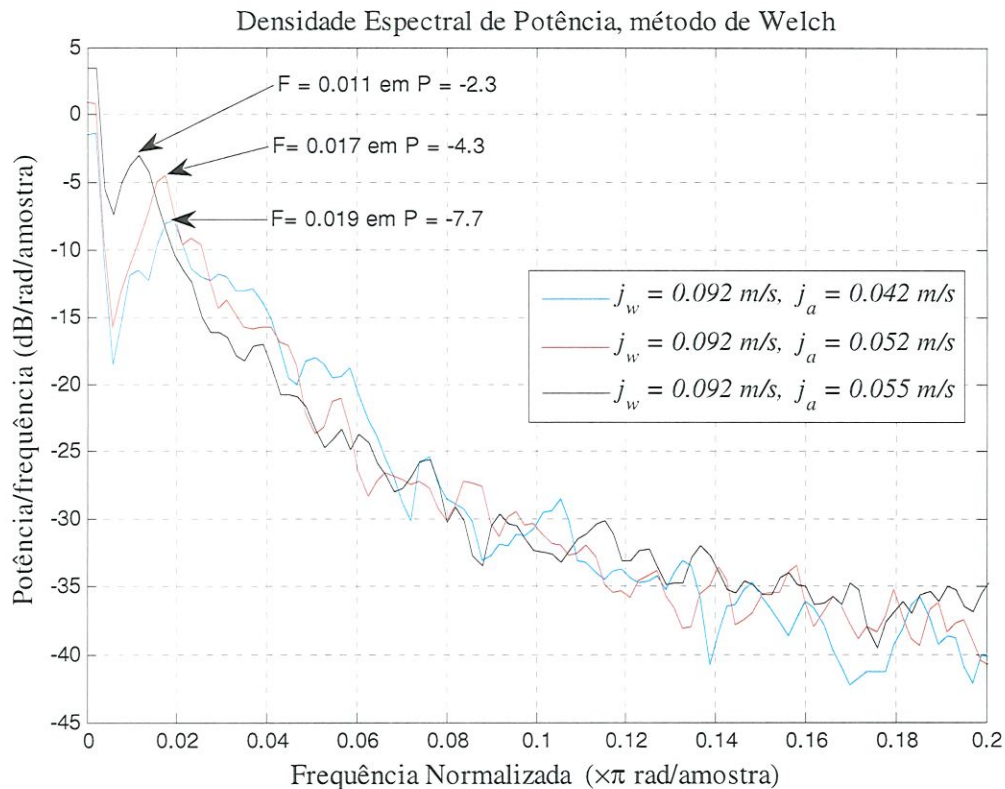


Figura 5.28. Distribuição Espectral de Potência, PSD.

Nos eixos cartesianos acima, a densidade espectral de potência é estimada pelo método de *Welch* e os dados são dispostos de maneira normalizada, pela frequência de amostragem, que no caso em estudo foi de 100 Hz (amostras/s). O método de *Welch*, de maneira simplificada consiste em: (i) separar o sinal em um número determinado de segmentos da fração de vazio temporal, os quais serão sobrepostos, equação (5.21); (ii) cada segmento é janelado, o janelamento serve para aumentar as características dos sinais amostrados (Fração de vazio temporal), como seu efeito é maior nos dados presentes no centro que nos extremos dos segmentos, estes últimos podem sofrer perdas, a sobreposição minimiza essas perdas; (iii) ao final deste processo, a Transformada de Fourier Discreta é

aplicada, computando o quadrado do resultado obtido. São feitas médias dos valores obtidos, tendo à final potência x frequência, Figura 5.28.

Para conseguir a média partir do sinal de fração de vazio. Divide-se a sequência $x(n)$ = sinal da fração de vazio em K_f segmentos com uma janela de comprimento L_f ;

$$x_r(n) = x(rR_f + n)w(n); \quad 0 \leq n \leq L_f - 1, \quad 1 \leq r_f \leq K_f \quad (5.21)$$

os segmentos podem ser próximos ($R_f = L_f$) ou não ($R_f < L_f$).

onde fração de vazio do segmento r_f , é:

$$\hat{S}(\omega) = \frac{1}{LU} |V_r(\omega)|^2 \quad (5.22)$$

A média do periodograma ou fração de vazio, é:

$$\bar{S}(\omega) = \frac{1}{K_f} \sum_{r_f=0}^{K_f-1} \hat{S}_r(\omega) \quad (5.23)$$

Dos escoamentos dispostos na Figura 5.24, três foram escolhidos, para não poluir a imagem da Figura 5.28 e facilitar a leitura. Destacam-se os seguintes pontos da análise: (i) conforme a vazão de ar é aumentada, conseqüentemente a fração de vazio, a frequência de passagem de bolhas diminui, para uma mesma vazão de água; e (ii) a potência tem um comportamento contrário ao da frequência, aumenta com o aumento da vazão de ar, o sinal fica em estado alto por mais tempo.

Ambos os resultados são explicados pelo aumento do tamanho médio das bolhas, isso implica em menos bolhas passando num mesmo período, porém um sinal de fração de vazio instantâneo mais longo no tempo, assim, o sinal tem mais energia, porém menor frequência. Resultados similares foram encontrados em (SASIC et al., 2007; SVENSSON et al., 1996; VAN DER SCHAAF et al., 2004).

5.5.4. Tratamento de sinais para cálculo de frequência de passagem

Para calcular a frequência de passagem de bolhas e também o comprimento da bolha (em frames da AWMS), este segundo utilizado para a estimativa de velocidade de passagem, o sinal temporal de fração de vazio foi utilizado, mas de maneira diferente: se fosse feita a

análise as velocidades superficiais de $j_w = 0.092$ e $j_a = 0.042$, o nariz e a cauda da bolha poderiam ser determinados erroneamente, já que quando a bolha se inicia ou termina, geralmente apenas um ponto da AWMS consegue percebê-la, tornado a fração de vazio da seção transversal quase insignificante. Tomando então somente um ponto da AWMS, na parte superior da seção transversal (ponto 2x8 da AWMS), na coluna central, pode-se obter algo parecido com uma onda quadrada: 1 para quando há ar e 0 para quando há água. Desta maneira fica muito fácil determinar o início e o final da bolha, bem como seu comprimento, Figura 5.29. Até onde este autor tem conhecimento, é a primeira vez que um sensor “wire-mesh” é utilizado dessa maneira.

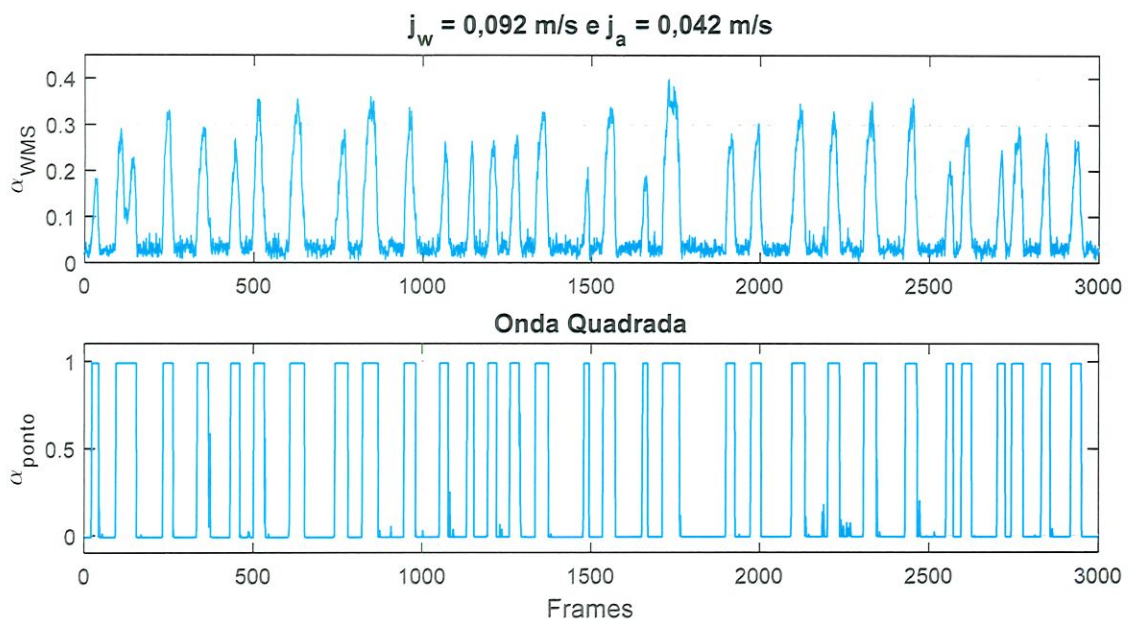


Figura 5.29. Fração de vazio temporal e onda quadrada gerada.

5.5.5. Câmera de alta velocidade análise da velocidade de passagem das bolhas

Na imagem do sincronismo mostrada Figura 5.26 e Figura 5.27 não aparecem as informações obtidas por meio da câmera de alta velocidade. Nessas figuras, as fotografias da bolha e do pistão são da câmera do PIV. Os vídeos gravados pela câmera de alta velocidade foram utilizados para a estimativa das velocidades de deslocamento das bolhas. Para isso, foram aplicadas duas técnicas distintas, as quais possibilitaram a comparação das 3 maneiras de sensoriamento utilizadas:

- a. Calculando a velocidade de passagem somente com a câmera de alta velocidade, V_{HSVC} . O vídeo gravado filmou a seção de visualização inteira, sabendo-se o seu comprimento, L_{box} , 47,5 cm, e o tempo que cada bolha levou para cruzar esta seção, tendo como referência o nariz da bolha, ou seja, o tempo que leva para passar o nariz pela seção de visualização t_{box} , obtém-se a velocidade média. Contando o número de frames para cada bolha cruzar a seção e utilizando a relação 100 frames/s (o que dá 0,01 s/frame), tem-se o tempo. Com a equação (5.24) calculava-se a velocidade,

$$V_{HSVC} = \frac{L_{box}}{t_{box}} \quad (5.24)$$

- b. Calculando a velocidade média baseado nos dados da AWMS, V_{WMS} . Media-se o tempo necessário para cada bolha cruzar o sensor, t_{bubble} , como a AWMS não dá nenhuma informação de espaço em metros, essa informação veio do comprimento médio das bolhas, $L_{bubble-PIV}$, obtido pelo PIV. Novamente, com a relação de 0,01 s/frame, obtinha-se o tempo de cruzamento do sensor, e aplicando a equação (5.25) a velocidade média,

$$V_{WMS} = \frac{L_{bubble-PIV}}{t_{bubble}} \quad (5.25)$$

onde V_{AWMS} e t_{bubble} representam, respectivamente, a velocidade da bolha pelo AWMS e o tempo para cruzar pela AWMS. $L_{bubble-PIV}$ é o comprimento médio das bolhas capturadas pela câmera PIV, cada bolha teve seu comprimento medido em pixels por medidas diretas na imagem, depois converteu em [mm] usando a calibração [mm / pixels] dada pelo software PIV e fez-se a média dos comprimentos. Equação (5.26) foi aplicado para obter $L_{bubble-PIV}$:

$$L_{bubble-PIV} = \frac{1}{3000} \sum_{i=1}^{3000} L_i \quad (5.26)$$

onde L_i é o comprimento da i_{th} bolha capturada pela câmera PIV. Resultados podem ser vistos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4. Comparação de resultados para velocidades de passagem das bolhas.

<i>Vazão de Água [L/min]</i>	<i>Velocidade superficial de Água – J_w [m/s]</i>	<i>Vazão de Ar [L/min]</i>	<i>Velocidade superficial de Ar – J_a [m/s]</i>	<i>Velocidade por HSVC [m/s]</i>	<i>Velocidade - por permissividade - AWMS [m/s]</i>	<i>Velocidade - por condutividade AWMS [m/s]</i>	<i>Erro relativo (%) HSVC x Permissividade</i>	<i>Erro relativo (%) HSVC x Condutividade</i>
180	0.187	35	0.036	0.911	0.885	0.882	2.9	3.24
180	0.187	39	0.041	0.911	0.928	0.922	1.86	1.2
240	0.249	32	0.033	0.955	0.927	0.984	2.96	3.01
240	0.249	36	0.037	0.929	0.937	1.026	0.84	9.43

A análise foi aplicada para os escoamentos de ‘c’ $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,036$ m/s a ‘f’ $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,037$ m/s onde foi utilizado o PIV. Para a AWMS, modelos de permissividade e condutividade foram utilizados, mostrando resultados similares. A técnica da câmera de alta velocidade se mostra interessante, pois é não intrusiva, não tendo efeitos sobre o escoamento, já a técnica da AWMS mostra mais uma possível aplicação do sensor, pois além de gerar informações valiosas do escoamento com suas medições na seção transversal (mostrando como é o formato da bolha, por exemplo), ele pode ser utilizado para obtenção de outras características do escoamento: velocidade e frequência de passagem de bolhas.

5.6. Escoamentos laminares, turbulentos e estratificados em geometria anular com diâmetro externo de 155 mm e interno de 125 mm.

A mudança feita na geometria anular foi a alteração do diâmetro do tubo interno de PVC de 60 mm para 125 mm, modificando significativamente a razão de radio para $\alpha_r = 0.8$. O tubo externo foi mantido o mesmo (155 mm), desta maneira, o diâmetro hidráulico foi diminuído de 95 mm para 30 mm e a diferença entre os raios dos tubos, que é a região de medições do PIV, de 47,5 mm para 30 mm, Figura 5.30. As dimensões principais do novo duto anular após a modificação: diâmetro externo de 155 mm, diâmetro interno de 125 mm, diâmetro hidráulico de 30 mm e $L = 10,5$ m. A seção de visualização utilizada e a distância de sua instalação em relação à entrada dos fluidos ($L = 5,2$ m) no duto foram às mesmas. Os experimentos foram realizados com o duto na horizontal (zero graus), com o propósito de estudar e analisar o padrão estratificado.

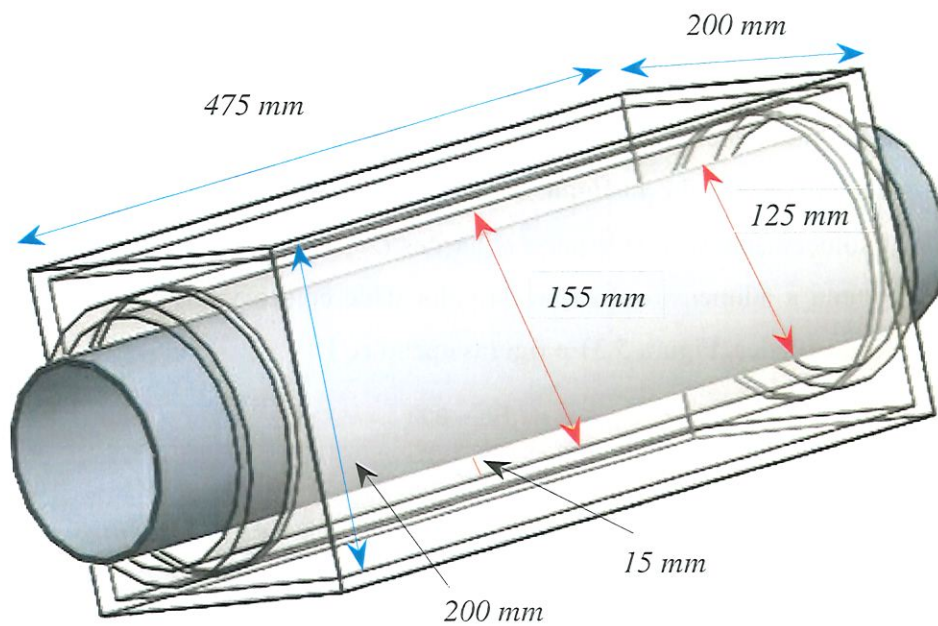


Figura 5.30. Seção de visualização para a nova geometria de duto anular com diâmetro externo de 155 e interno de 125 mm.

5.6.1. Escoamentos monofásicos laminares.

Para a validação das novas medições do PIV, procedeu-se da mesma maneira que para a geometria anterior, comparando o perfil experimental de velocidades com o analítico para escoamentos monofásicos laminares completamente desenvolvidos. Dessa maneira, as seguintes condições devem ser cumpridas.

- Condição para o escoamento ser laminar

$$Re < 2000,$$

- Condição para o escoamento estar desenvolvido na região de medições

$$L > 0,065D_h Re \tag{5.27}$$

$$Re = \frac{\rho V D_h}{\mu} \tag{5.28}$$

$$D_h = D_{max} - D_{min} \tag{5.29}$$

Como era desejado que o escoamento estivesse completamente desenvolvido na região de medições do PIV, a qual se encontrava a 5,2 m do ponto de injeção dos fluidos, a vazão de água foi limitada em 26 L/min. Foi possível realizar medições satisfatórias para três vazões de água distintas 4.3, 7 e 11 l/min, com $Re \sim 300, 500$ e 800 , e comparar os resultados obtidos com a solução analítica dada pelas equações (5.10) e (5.11). Para a apresentação dos resultados, foi feita a adimensionalização da velocidade com o valor máximo medido para cada perfil de velocidades, Figura 5.31 e figuras apêndice D.

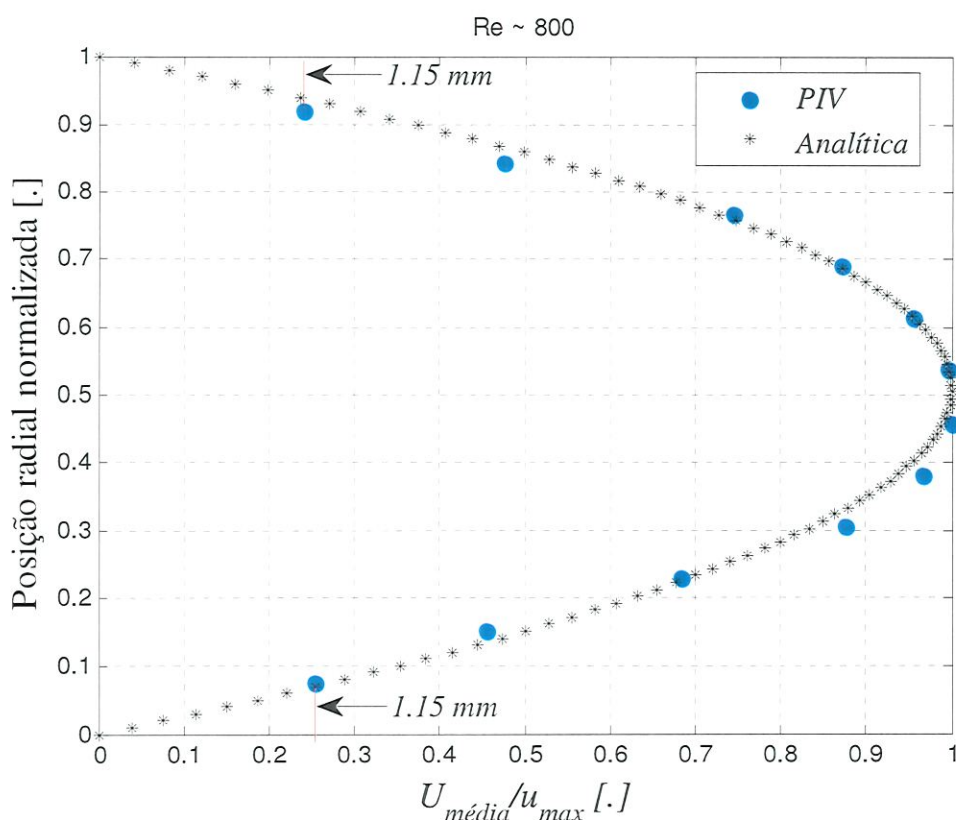


Figura 5.31. Velocidade axial média, adimensional calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por meio do PIV e analiticamente para escoamento laminar no duto anular, com $Re=800$.

Como as vazões para o escoamento laminar são baixas, as quedas de pressão no escoamento são muito baixas, da ordem da precisão dos medidores disponíveis. Desta maneira, elas foram determinadas indiretamente, a partir da vazão volumétrica da água, equação (5.11), Figura 5.30.

Os perfis de velocidade para escoamento laminar da Figura 5.31 e figuras apêndice E, mostram boa semelhança com o perfil analítico dado pela equação (5.10), os perfis foram calculados para o número de Reynolds de 300, 500 e 800 respectivamente.

O erro calculado, Equação (5.4), da velocidade média obtida pelo PIV com a média analítica equação (5.10) é de 5.3% para a Figura 5.31, respectivamente, Tabela 5.5 colunas 9. Enquanto com a velocidade máxima o erro segundo a equação 5.30 tem valores inferiores a 11% Tabela 5.5, coluna 12. O primeiro ponto obtido perto da parede para os três escoamentos laminares da Figura 5.31, fica a uma distância não superior a 1,15 mm das paredes do lado inferior e superior do duto anular.

$$e(\%) = 100 \frac{|V_{\text{maxima PIV}} - V_{\text{maxima Analítica}}|}{V_{\text{maxima PIV}}} \quad (5.30)$$

Tabela 5.5. Principais características dos escoamentos bifásicos estratificados e monofásicos laminares

<i>Escoamento</i>	<i>Número de Reynolds</i>	<i>Vazão Água [L/min] Q_w</i>	<i>Vazão Ar [L/min] Q_a</i>	<i>Altura da interface Estratificado</i>	<i>Velocidade de média PIV [m/s]</i>	<i>Velocidade de média, [m/s] $v_{medidor} = Q/A$</i>	<i>Velocidade e média, analítica [m/s]</i>	<i>Erro relativo (%) média, analítica</i>	<i>Velocidade e máxima [m/s] PIV</i>	<i>Velocidade máxima analítica [m/s]</i>	<i>Erro relativo (%) máxima analítica</i>	<i>Fração de Vazio</i>
Laminar	300	4,3	--	--	0.0102	0.0109	0.0108	5.3	0.0171	0.0163	4.8	0
Laminar	500	7	--	--	0.0169	0.0177	0.0175	3.1	0.0275	0.0265	3.5	0
Laminar	800	11	--	--	0.0293	0.0278	0.0275	6	0.0469	0.0417	11	0
Estratificado	1836	9	1181	50 mm	0.07	--	--	--	0.09	--	--	0.62 ou 62%
Estratificado	3888	31	95	100 mm	0.13	--	--	--	0.15	--	--	0.39 ou 39%

5.6.2. Escoamento monofásico turbulento.

Na Figura 5.32 se apresentam três perfis turbulentos com número de Reynolds de 8700, 11900 e 15200, obtidos mediante a equação (5.2). Pode-se ver que os pontos na parede superior e inferior medidos pelo PIV estão a uma distância de 1,15 mm. À medida que aumenta o número de Reynolds, a velocidade média aumenta proporcionalmente, Tabela 5.6, coluna 4, o erro calculado pela equação (5.31), segundo a medida pelo medidor de vazão, para os três número de Reynolds são de 8,5, 7,6 e 9,6 % respectivamente Tabela 5.6, coluna 7. Os três perfis têm forma achatada e similar, em contraste com o formato pontiagudo dos laminares. A máxima velocidade se apresenta a uma distância da parede inferior (tubo externo) do anular, para os três escoamentos turbulentos, de 7,8 mm, Figura 5.32, ou seja, mais próxima da parede superior (parede tubo interno).

$$e(\%) = 100 \frac{|V_{\text{média PIV}} - V_{\text{média MedidorVazão}}|}{V_{\text{média PIV}}} \quad (5.31)$$

onde $V_{\text{média Medidor Vazão}}$ é igual a $v_{\text{medidor}} = Q/A$, v_{medidor} é a velocidade média, Q é a vazão volumétrica de água e A é a área da secção transversal.

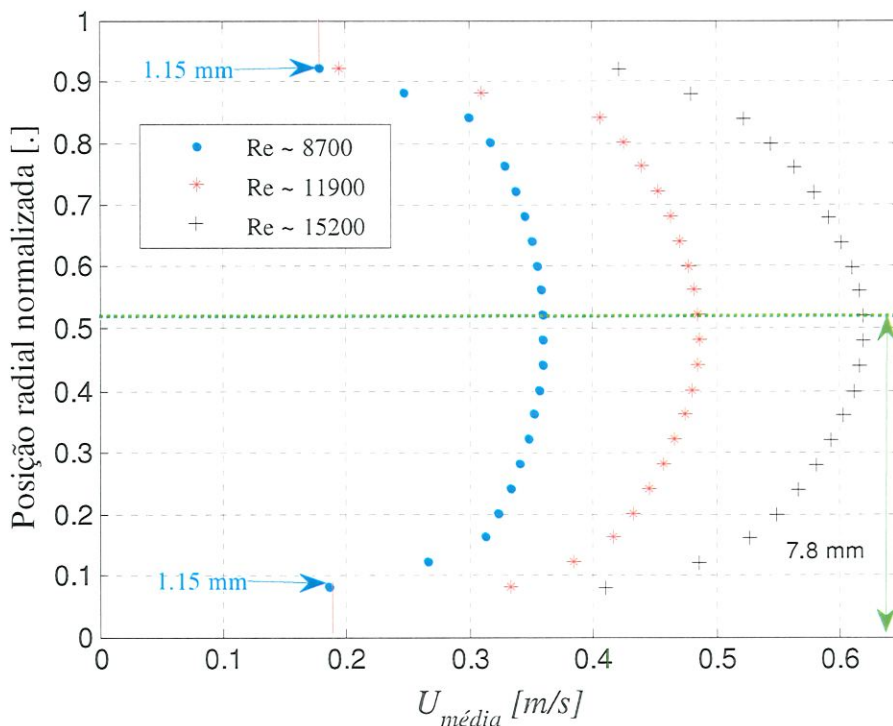


Figura 5.32. Velocidade axial média calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por meio do PIV para escoamentos turbulentos.

5.6.3. Comparação de perfis de velocidade média laminar e turbulento.

Na Figura 5.33 são comparados os perfis laminar e turbulento. Mostra-se a diferença na forma dos perfis: os laminares são pontiagudos, enquanto os turbulentos são mais achatados. Nas Tabela 5.5 e 5.6 são apresentados todos os dados que caracterizam os perfis laminares e turbulentos.

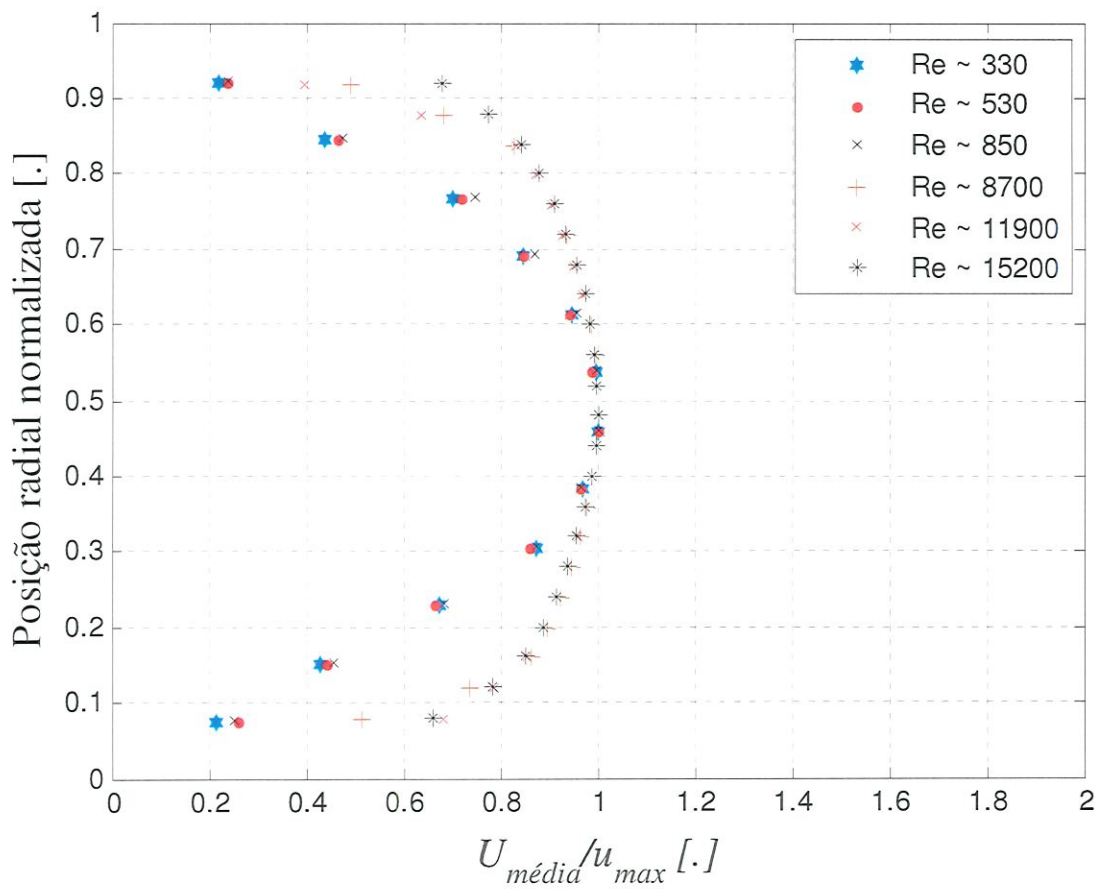


Figura 5.33. Comparação de perfis médios de velocidade, Laminar e Turbulento.

Tabela 5.6. Principais características dos escoamentos turbulentos

<i>Escoamento</i>	<i>Número de Reynolds</i>	<i>Vazão [L/min] Q_w</i>	<i>Velocidade média [m/s] PIV</i>	<i>Velocidade média, medidor de vazão [m/s] $v_{medidor}=Q/A$</i>	<i>Velocidade máxima PIV [m/s]</i>	<i>Erro relativo (%)</i>	<i>DP_EH(-3~3kPa)[Pa]</i>	<i>Ponto máximo Tensão de cisalhamento de Reynolds parede inferior</i>	<i>Ponto máximo Tensão de cisalhamento Reynolds parede superior</i>
Turbulento	8700	115	0.32	0.29	0.36	8.5	149	-0.15 a 2.4 mm	0.08 a 3.6 mm
Turbulento	11900	157	0.43	0.40	0.49	7.6	315	-0.20 a 2.4 mm	0.12 a 3.6 mm
Turbulento	15200	200	0.56	0.51	0.62	9.6	540	-0.29 a 2.4 mm	0.18 a 3.6 mm

5.6.4. Tensão de cisalhamento de Reynolds para os escoamentos turbulentos.

A tensão de cisalhamento de Reynolds é mostrada na Figura 5.34, uma vez que o escoamento no duto anular está totalmente desenvolvido e em um estado estatisticamente estável, Figura 5.34, (WESTERWEEL, 1997b), (WESTERWEEL et al., 1997), (VAN DOORNE; WESTERWEEL, 2007).

A tensão de cisalhamento de Reynolds foi calculada por meio da equação (5.9), Figura 5.34, e seus valores máximos se apresentam a uma distância de 3,6 mm e 2,4 mm da parede superior e inferior do duto anular, respectivamente, para os três escoamentos turbulentos mostrados Figura 5.32. A Figura 5.34 indica que à medida que aumentam os números de Reynolds também aumentam os picos das tensões de cisalhamento, Tabela 5.6 colunas 10 e 11, correspondendo à literatura existente, (EGGELS et al., 1994).

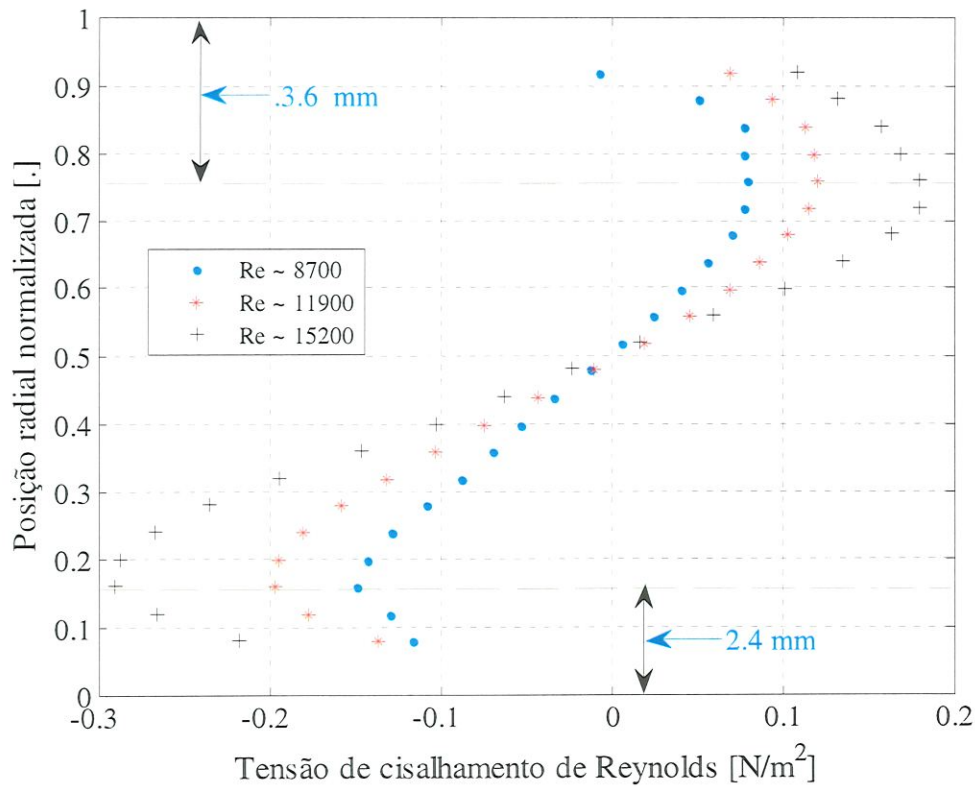


Figura 5.34. Tensão de cisalhamento de Reynolds medida experimentalmente para escoamento turbulento.

Esta distribuição de tensão de cisalhamento é independente do escoamento do duto, porque em ambos os casos a tensão cisalhante equilibra a diferença de pressão a que o fluido está sujeito.

Na região do centro, Figura 5.34, as tensões de cisalhamento viscosas são pequenas, por tanto, na parede, a tensão de cisalhamento viscoso torna-se importante. O pico próximo ao tubo interno tem magnitude menor que o próximo ao tubo externo, isso é explicado pela menor tensão de cisalhamento na parede interna. Na posição radial correspondente a sua velocidade máxima, a tensão de cisalhamento tende a zero, conforme observado na literatura de estudos para tubos, Eggels et al, (1994) e Westerweel et al, (2013).

5.6.5. Flutuações na direção axial para escoamentos turbulentos.

Na Figura 5.35 apresenta-se a flutuação axial da velocidade para os três números de Reynolds selecionados. É possível ver que os pontos máximos de flutuação axial se encontram próximos às paredes inferior e superior do duto anular, a uma distância de 1,2 mm, e os pontos mínimos de flutuação axial se encontra a uma distância aproximadamente de 7,5 mm, no centro da parte inferior do duto anular. As flutuações axiais e radiais foram calculadas mediante as equações (5.7) e (5.8), respectivamente.

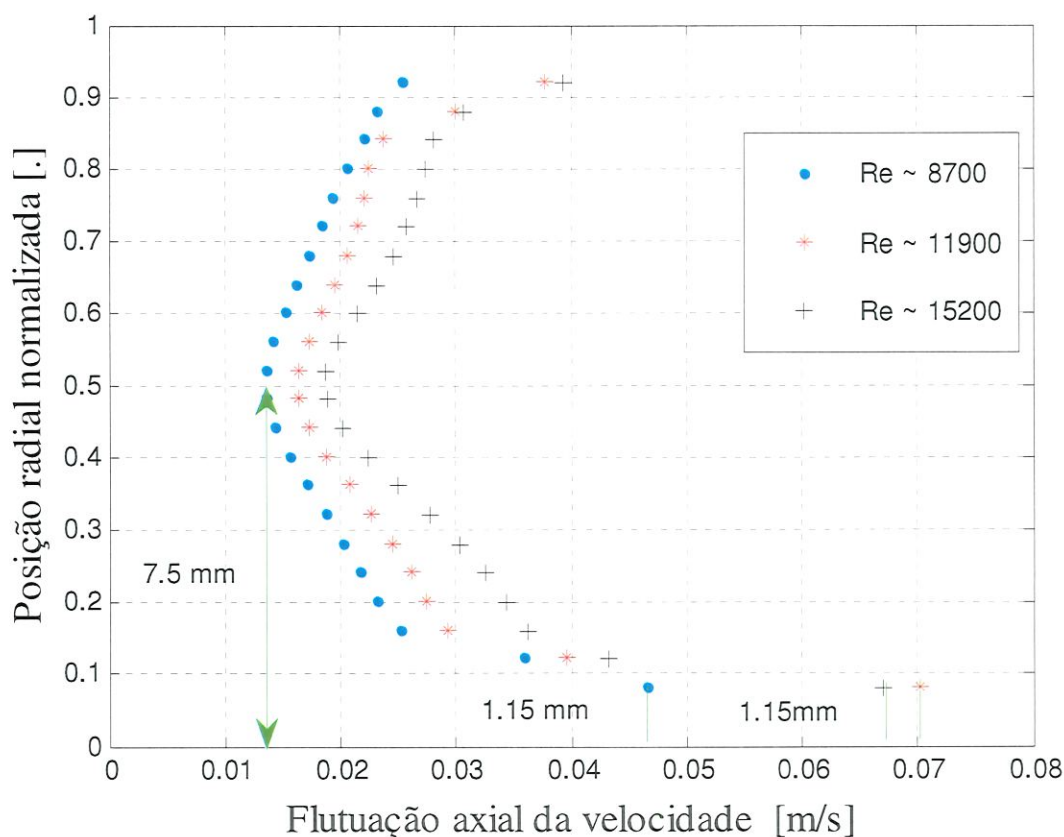


Figura 5.35. Flutuações na direção axial para escoamentos turbulentos, U_{rms} .

Na Tabela 5.7 se mostram os resultados das flutuações mínimas e máximas, tanto radial como axial, com suas respectivas velocidades médias de escoamento. Na coluna 6 da Tabela 5.7 se pode ver que para os três números de Reynolds o valor porcentual da velocidade mínima de flutuação não supera 4,24% da velocidade média do escoamento, para o Reynolds de 8700, Tabela 5.6 coluna 4, o qual é baixo, enquanto a flutuação máxima axial não supera 16,33% para o número de Reynolds de 11900, Tabela 5.7 coluna 7.

5.6.6. Flutuações na direção radial para escoamento turbulento.

Para as flutuações radiais de velocidade, Figura 5.36, se observam as baixas flutuações em comparação com as flutuações axiais, Figura 5.35.

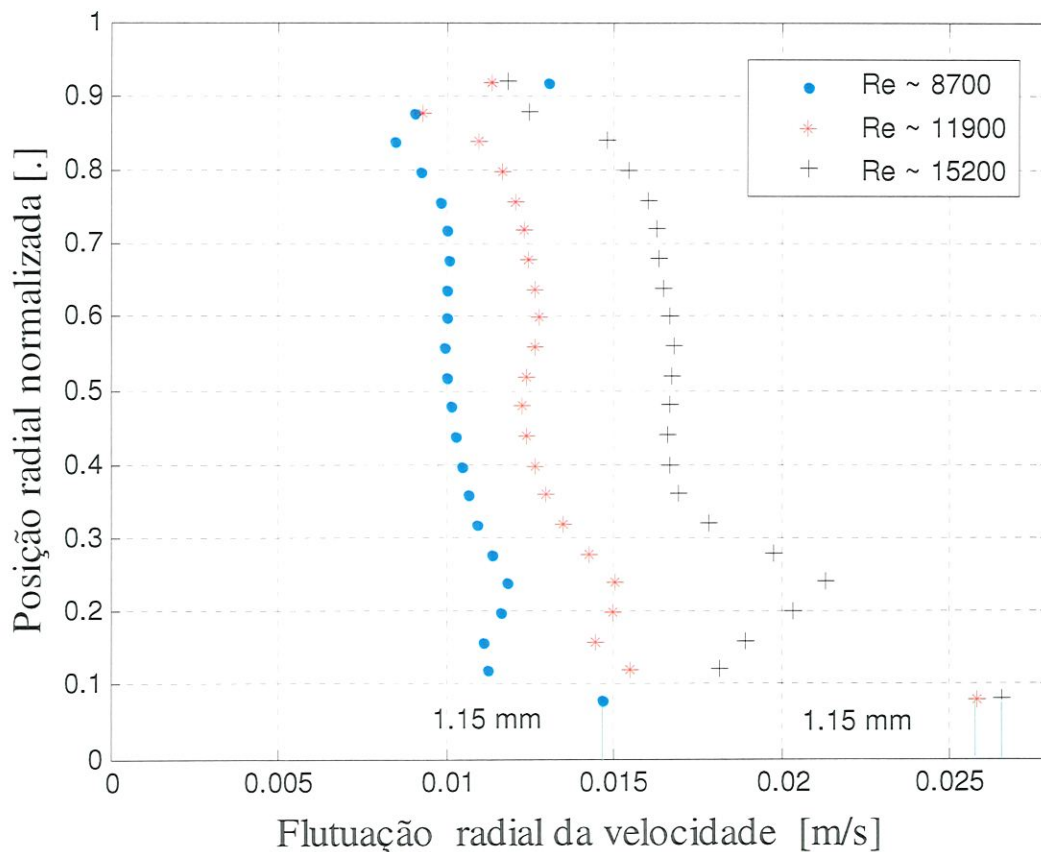


Figura 5.36. Flutuações na direção radial para escoamentos turbulentos, V_{rms}

Os valores máximos e mínimos são apresentados na Tabela 5.7, colunas 8 e 9. Na Tabela 5.7, coluna 12, pode-se ver que a flutuação radial máxima representa no máximo 6,02% da velocidade média do PIV, para o número de Reynolds de 11900. Para os demais escoamentos essa porcentagem é menor, Figura 5.36. Esta observação é confirmada pelo trabalho de Kumara et al. (2010), Elseth (2001), Toonder et al. (1997), Eggels et al. (2006) e Westerweel, et al. (1996). Os pontos com os valores máximos de flutuações radiais se encontram a uma distância de 1,15 mm da parede inferior do tubo externo, enquanto a flutuação mínima se encontra no centro da parte inferior do duto anular.

Tabela 5.7. Flutuações radiais (V_{rms}) e axiais (U_{rms}) para escoamentos turbulentos.

<i>Escoamento</i>	<i>Número de Reynolds</i>	<i>U_{rms} Máximo [m/s]</i>	<i>U_{rms} Mínimo [m/s]</i>	<i>% U_{rms} Mínimo vs velocidade média PIV</i>	<i>% U_{rms} Máximo vs velocidade média PIV</i>	<i>V_{rms} Máximo [m/s]</i>	<i>V_{rms} Mínimo [m/s]</i>	<i>% V_{rms} Mínimo vs velocidade média PIV</i>	<i>% V_{rms} Máximo vs velocidade média PIV</i>
Turbulento	8700	0.05 em 1.2 mm	0.013 em 7.5 mm	4.24	14.63	0.015 em 1.2 mm	0.008 a 2.4 mm	2.67	4.62
Turbulento	11900	0.07 em 1.2 mm	0.016 em 7.5 mm	3.79	16.33	0.026 em 1.2 mm	0.009 a 1.8 mm	2.17	6.02
Turbulento	15200	0.07 em 1.2 mm	0.019 em 7.5 mm	3.35	12.00	0.027 em 1.2 mm	0.012 a 1.2 mm	2.11	4.75

5.6.7. Análise de turbulência em escoamento monofásico turbulento.

Em um escoamento turbulento desenvolvido hidrodinamicamente, as velocidades instantâneas são não nulas nas três direções que definem o espaço, diferentemente de um escoamento laminar, em que a única componente não nula é a axial. O sistema PIV utilizado nos experimentos é capaz de medir perfis no plano, pois consiste em somente uma câmera, dando informações sobre as velocidades axiais e radiais. Nos experimentos, foram tomados 3000 frames para a convergência dos perfis e das estatísticas, a média na direção axial é a média do perfil médio axial, Figura 5.32, a qual deve ser idealmente a mesma dada pela medição dos medidores de vazão. A média na direção radial deve ser nula. Os valores instantâneos oscilam em torno dos valores médios, como mostram as Figura 5.37 e Figura 5.38. Para a velocidade axial, o valor está oscilando em torno da média medida pelo PIV, a qual é próxima da obtida por meio de sensores de vazão instalados na linha. Para a velocidade radial, os valores instantâneos estão oscilando em torno de um valor médio não nulo baixo de $-0,005$ m/s. Isso é explicado por erros presentes nas medições; percebe-se que o erro está na terceira casa decimal, ou seja, uma ordem de grandeza menor que a considerada nos perfis do PIV, onde parou-se na segunda casa decimal.

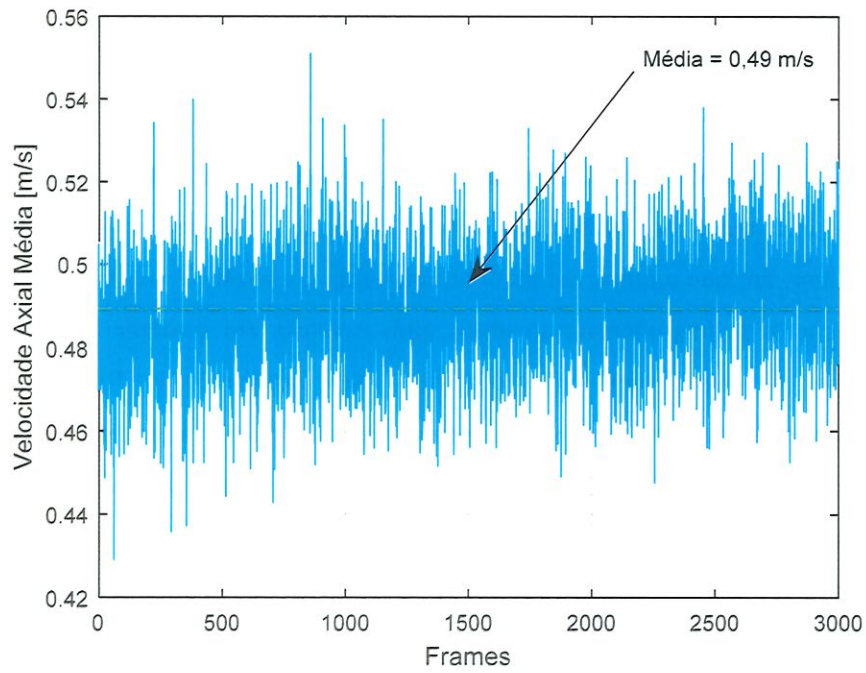


Figura 5.37. Oscilação das velocidades médias axiais de cada frame.

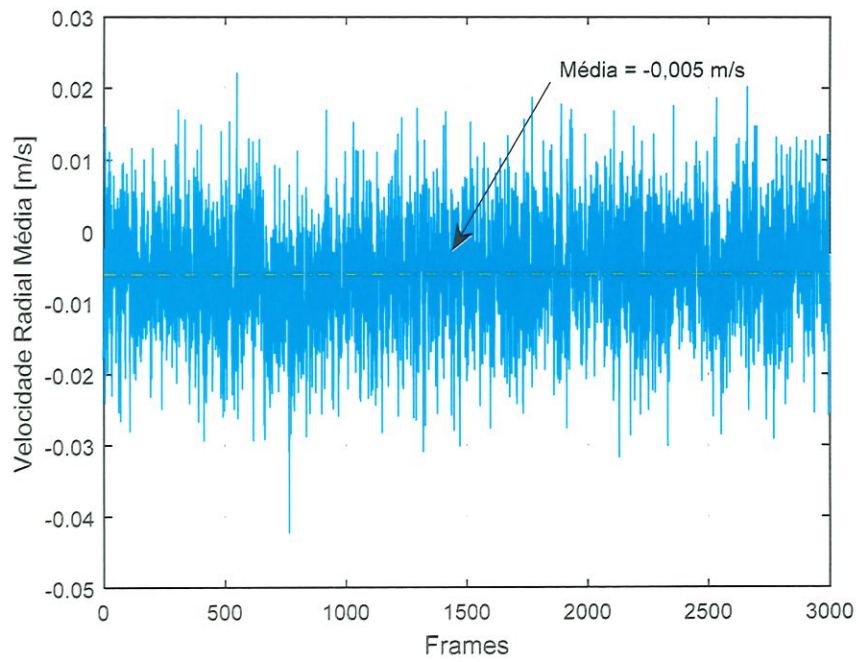


Figura 5.38. Oscilação das velocidades médias radiais em cada frame.

5.6.8. Análise tensões de cisalhamento e a lei de parede dos escoamentos turbulentos.

O deslocamento do ponto de velocidade máxima (Figura 5.32) em direção à parede interna indica redução da proporção de esforço de cisalhamento na parede interna, em comparação com a parede externa, uma vez que um balanço de força mostra que a tensão de cisalhamento da parede interna deve equilibrar a força de pressão em uma área. Para os experimentos na segunda geometria, as quedas de pressão foram medidas e, assim, puderam ser calculadas as tensões cisalhantes nas paredes do duto, seguindo a Figura 5.39 e as equações (5.32) a (5.35):

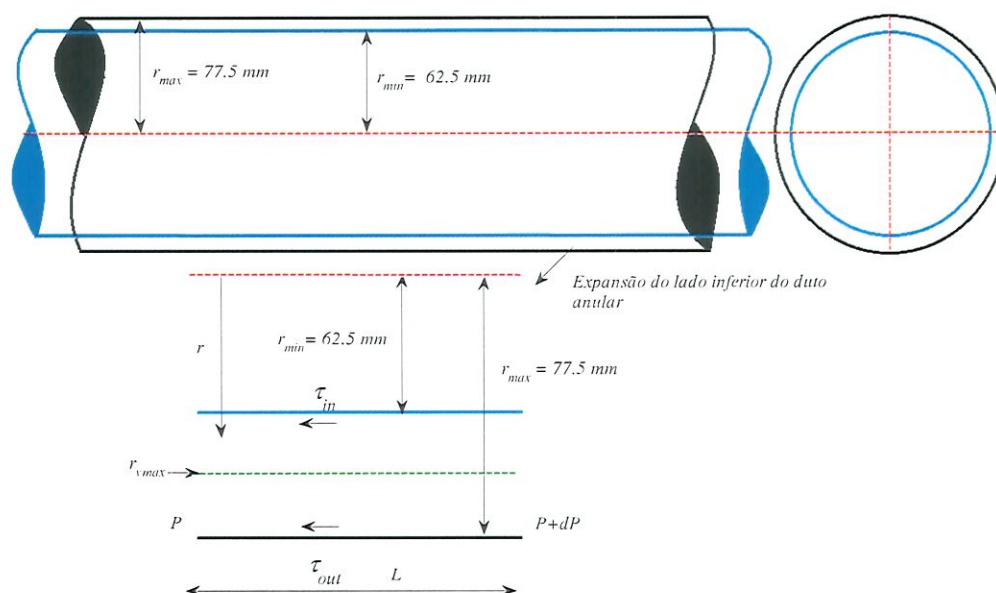


Figura 5.39. Modelagem da tensão cisalhante no duto anular

Na Figura 5.39, o ponto r em que se deseja obter a tensão de cisalhamento está entre o ponto de velocidade máxima (r_{vmax}) e o tubo interno (r_{min}). Sabendo que em r_{vmax} a tensão cisalhante é nula, tem-se o seguinte equilíbrio de forças:

$$\Delta P \pi (r_{vmax}^2 - r^2) = \tau 2\pi r L \quad (5.32)$$

Isolando τ , vem:

$$\tau = \frac{\Delta P}{L} \frac{1}{2} \left(\frac{r_{vmax}^2}{r} - r \right) \quad (5.33)$$

Com $r = r_{min}$, tem-se a tensão cisalhante na parede interna:

$$\tau_{in} = \frac{\Delta P}{L} \frac{1}{2} \left(\frac{r_{vmax}^2}{r_{min}} - r_{min} \right) \quad (5.34)$$

Fazendo um processo semelhante, agora para r entre r_{vmax} e o tubo externo, tem-se:

$$\tau_{out} = \frac{\Delta P}{L} \frac{1}{2} \left(r_{max} - \frac{r_{vmax}^2}{r_{max}} \right) \quad (5.35)$$

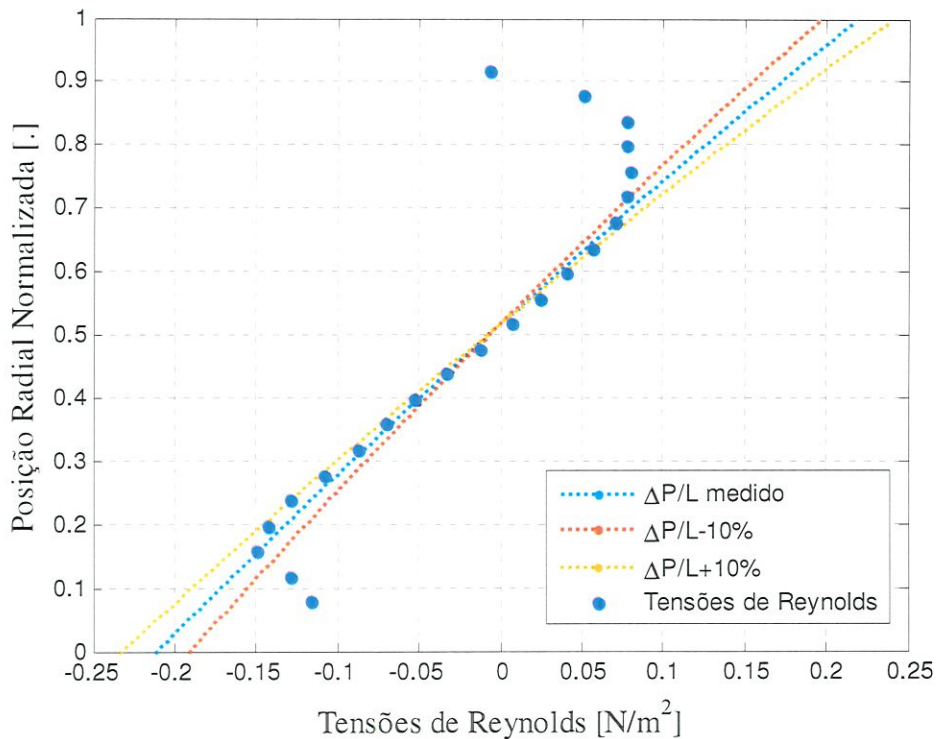


Figura 5.40. Comparação solução analítica e experimental para as tensões de cisalhamento.

Para conferir as médias dos perfis da velocidade experimentais com a "lei da parede", os resultados são mostrados em termos de U^+ versus Y^+ para o perfil interno (ou seja, a

Vê-se que a tensão cisalhante para dutos anulares não é uma reta como foi feito na analogia com tubos, porém para os valores de raios presentes na nova geometria, as curvas aproximam-se de retas. Na Figura 5.40 é plotada a curva das tensões de Reynolds calculadas pelo PIV juntamente com a obtida a partir da equação (5.33), com a queda de pressão medida experimentalmente. Vê-se grande concordância entre os dados, para o escoamento turbulento de $Re \sim 8700$.

distribuição da velocidade entre a parede interna do tubo interno e a localização da velocidade máxima) Figura 5.41. Da mesma forma, os resultados são mostrados em termos de U^+ versus Y^+ para o perfil externo (isto é, entre a parede externa do tubo externo e a localização da velocidade máxima), Figura 5.42.

As distribuições logarítmicas instituídas a partir dos dados de escoamentos em tubo de Nikuradse (constantes de 5.5 e 2.5) e como indicadas por Clauser (1956) com (constantes de 4.9 e 2.44) são indicadas para escoamento em duto anular nas Figura 5.41 e 5.42.

É complexo fazer medições de PIV na subcamada viscosa devido a distúrbios ópticos próximo da parede do tubo externo e interno. As medidas experimentais são comparadas com as leis de parede dadas pelas equações (5.13) e (5.14), como mostrado nas Figura 5.41 e 5.42.

Na Figura. 5.41 e 5.42 pode-se ver os resultados para a razão de raio $\alpha = 0,8$. O efeito da geometria do duto anular no perfil de velocidade da parede é reduzido; os perfis PIV são semelhantes aos perfis da lei da parede. Isto era esperado, porque neste caso o perfil de velocidade é mais simétrico, com gradientes de velocidade semelhantes perto de ambas as paredes. O efeito do número de Reynolds no perfil de velocidade também é insignificante.

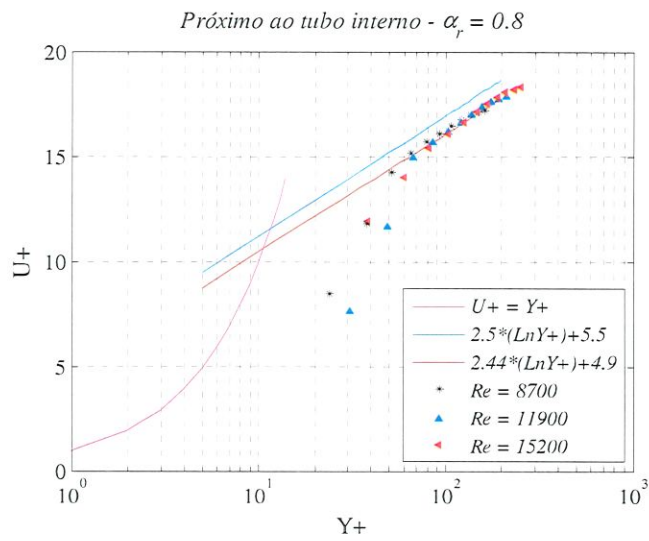


Figura 5.41. Perfis de velocidade adimensionais em função da posição adimensional $U+$, em escala logarítmica, para a lei da parede em escoamento turbulento, próximo ao tubo interno com razão de raio $\alpha_r = 0.8$.

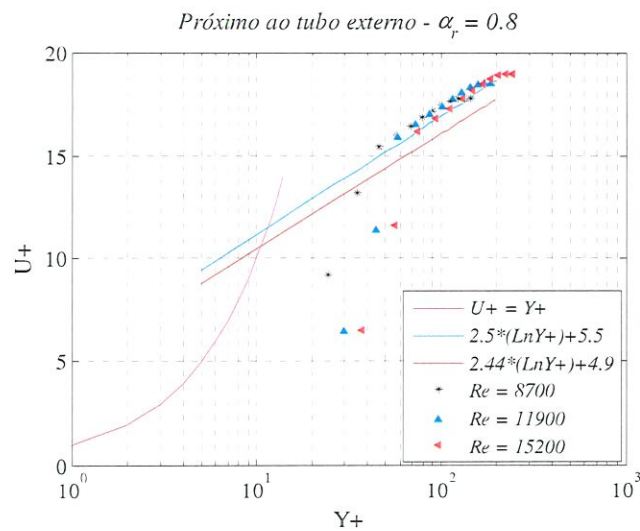


Figura 5.42. Perfis de velocidade adimensionais em função da posição adimensional $U+$, em escala logarítmica, para a lei da parede em escoamento turbulento, próximo ao tubo externo com razão de raio $\alpha_r = 0.8$.

5.6.9. Velocidade axial média calculada experimentalmente para escoamento estratificado.

Dois perfis para escoamentos estratificados foram analisados para uma altura da interface de 50 mm e 100 mm, com número de Reynolds de 1836 e 3888, Figura 5.43 e Figura 5.44. O número de Reynolds e a fração de vazio foram calculados mediante as equações do apêndice E, Tabela 5.8.

Os dois perfis têm forma diferente, apesar de ambos serem estratificados, mas com diferente altura da interface. O perfil da Figura 5.43, com altura de 50 mm (parede inferior do duto à interface) tem forma similar aos perfis laminares da Figura 5.31.

Fazendo uma comparação com o perfil laminar da Figura 5.31 com as velocidades médias do perfil estratificado das Figura 5.43 e Figura 5.44, Tabela 5.8, coluna 6, estas representam 46,74% e 23,76% da velocidade média do perfil laminar, Figura 5.31, respectivamente. O perfil da Figura 5.43 tem semelhança com o perfil laminar, Figura 5.31, e o perfil da Figura 5.44 tem semelhança com um perfil turbulento da Figura 5.32.

O primeiro ponto obtido pelo PIV fica a uma distância de 0,63 mm das paredes do tubo interno e externo, Figura 5.43 e Figura 5.44. A velocidade média, Tabela 5.8, coluna 6, do estratificado baixo de 50 mm, representa 50,84 % da velocidade média do perfil do estratificado alto de 100 mm.

Tabela 5.8. Principais características dos escoamentos bifásicos estratificados nova geometria.

<i>Escoamento</i>	<i>Número de Reynolds</i>	<i>Vazão Água [L/min]</i> Q_w	<i>Vazão Ar [L/min]</i> Q_a	<i>Altura da interface Estratificado</i>	<i>Velocidade média PIV [m/s]</i>	<i>Velocidade máxima [m/s] PIV</i>	<i>Fração de Vazio</i>
Estratificado	1836	9	1181	50 mm	0.07	0.09	0.62 ou 62%
Estratificado	3888	31	95	100 mm	0.13	0.15	0.39 ou 39%

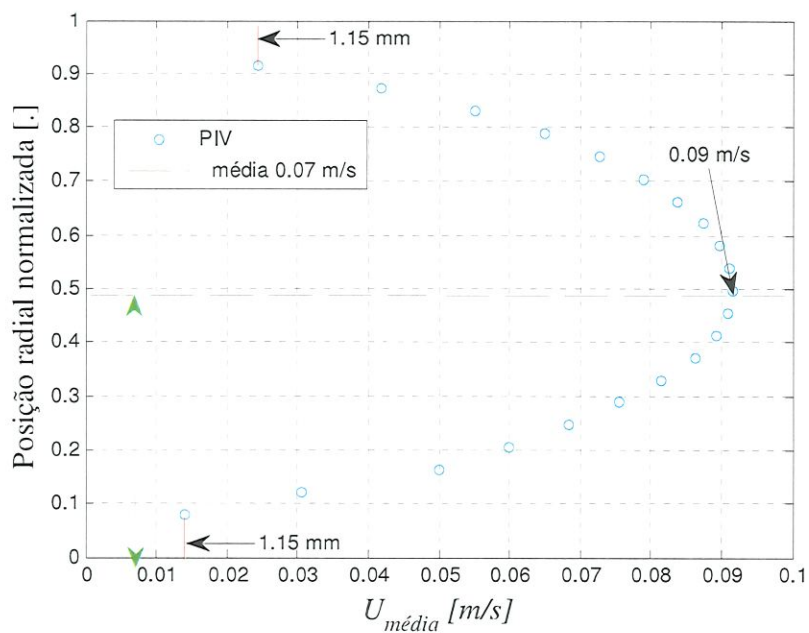


Figura 5.43. Velocidade axial média calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por PIV para escoamento estratificado com altura na interface de 50 mm com um número de Reynolds de 1836.

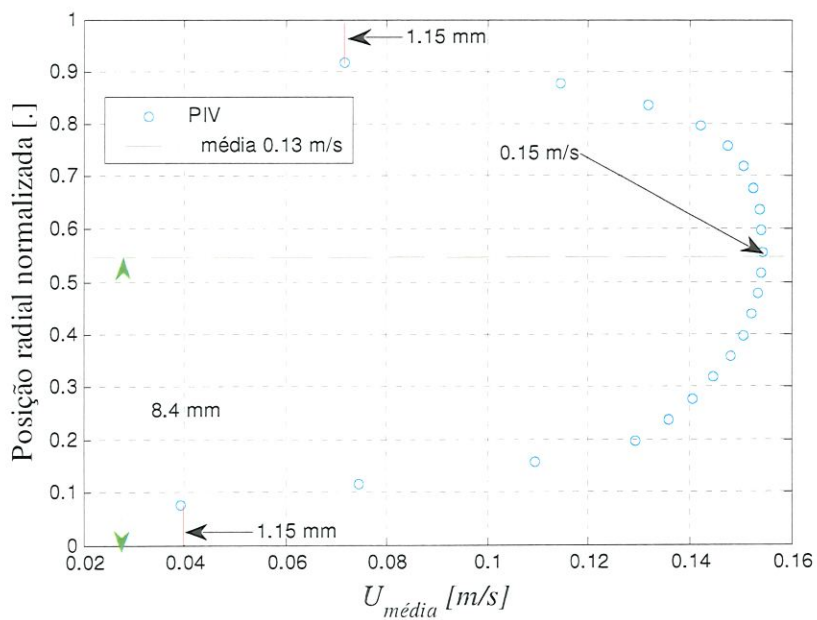


Figura 5.44. Velocidade axial média calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por meio do PIV para escoamento estratificado com altura na interface H de 100 mm, e um número de Re de 3888.

5.6.10. Análise da flutuação axial e radial para escoamento estratificado.

Analisando as flutuações médias das velocidades na direção axial, tem-se que as flutuações axiais máximas para o escoamento estratificado, com uma altura de 50 mm e 100 mm, representam 15% e 20,9% de sua velocidade axial média obtida por PIV, respectivamente, ver Figura 5.45 e Tabela 5.9. Enquanto que as flutuações radiais máximas são de 3,7% e de 5,3% de sua velocidade axial média obtida por PIV, para uma altura de 50 e 100 mm da interface para escoamento estratificado, respectivamente.

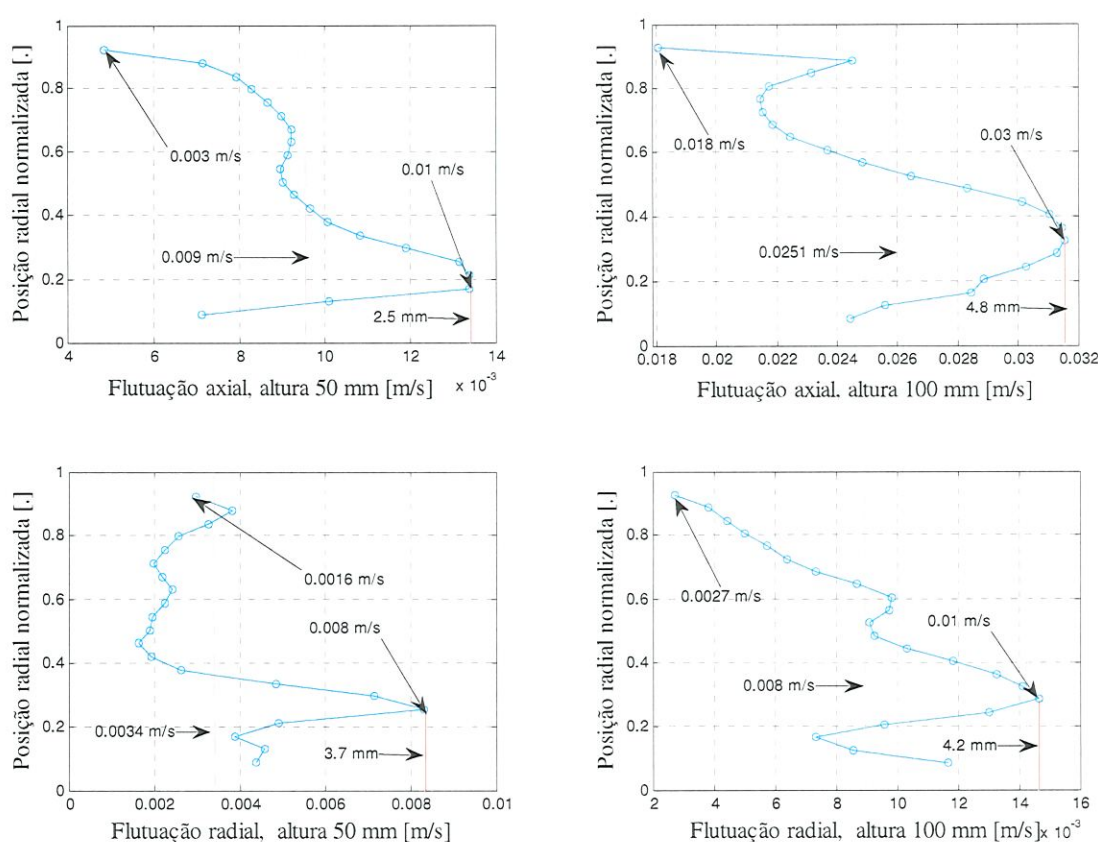


Figura 5.45. Flutuações axiais e radiais para escoamento estratificado com altura da interface de 50 mm e 100 mm.

Como eram esperadas, as flutuações axiais são maiores que as flutuações radiais, tal como acontece em tubos, segundo a literatura estudada (WESTERWEEL; ELSINGA; ADRIAN, 2013), (KUMARA et al., 2010) e (WESTERWEEL, 1997a). As flutuações axiais apresentam dois picos máximos de 0,01 m/s em 2,5 mm e 0,03 m/s em 4,8 mm, ambas em relação à parede do tubo externo, para os estratificados com altura de interface de 50 mm e

100 mm, respectivamente, Figura 5.45 e Tabela 5.9. As flutuações radiais apresentam dois picos máximos de 0.008 m/s em 3.7 mm e 0.01m/s em 4.2 mm, ambas em relação à parede do tubo externo, para os escoamentos estratificados com altura da interface de 50 mm e 100 mm respectivamente, ver Figura 5.45 e Tabela 5.9.

A flutuação radial média do escoamento com altura na interface de 50 mm representa aproximadamente 37% de sua flutuação axial média e para o escoamento com altura de interface de 100 mm representa 31% da flutuação axial, Figura 5.45. As flutuações axiais e radiais foram obtidas mediante as equações (5.7) e (5.8) respectivamente.

5.6.11. Tensão de cisalhamento de Reynolds em escoamento estratificado.

A tensão de cisalhamento de Reynolds foi calculada por meio da equação (5.9). Na tensão de cisalhamento de Reynolds para a altura da interface de 50 mm, Figura 5.46, observa-se um pico de maior magnitude de $-0,083 \text{ N/m}^2$ a uma distância de 3,75 mm da parede do tubo externo do duto anular. Da mesma maneira que para o escoamento estratificado da Figura 5.46, os valores de maior magnitude encontram-se perto da parede do tubo externo, apresentado valores que tendem a zero da posição radial normalizadas de $\sim 0,3$ a 1 para cima da parte inferior do duto anular.

Fazendo uma comparação entre os três escoamentos turbulentos analisados na Figura 5.34, o valor máximo, em magnitude, para a tensão de cisalhamento no escoamento estratificado com altura de interface de 50 mm representa, 28%, 21% e 14% em relação ao pico de magnitude máxima, para os escoamentos turbulentos de $Re \sim 8700$, 11900 e 15200, respectivamente. Enquanto que para o escoamento estratificado com altura na interface de 100 mm, as porcentagens são de, 20%, 15% e 10% aproximadamente, para os três escoamentos turbulentos da Figura 5.34. Nas Figura 5.46 e Figura 5.47 não se apresentam tensões de Reynolds próximas à parede inferior do tubo interno, como acontece com os escoamentos monofásicos turbulentos. Supõe-se que a interface dissipa energia cinética turbulenta.

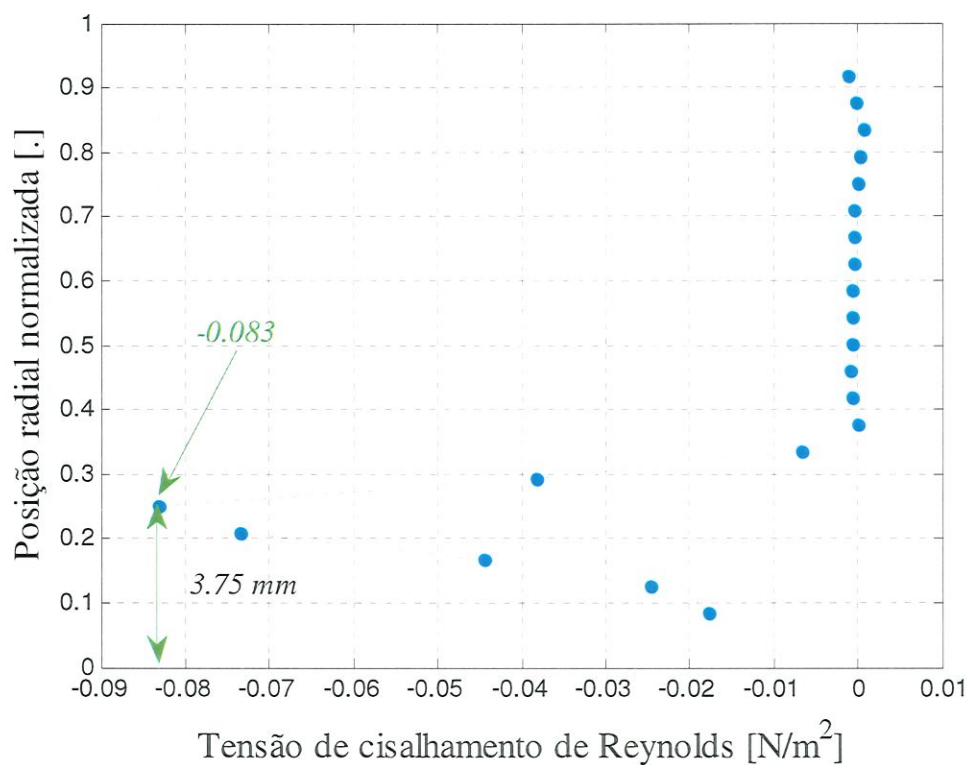


Figura 5.46. Tensão de cisalhamento de Reynolds para escoamento estratificado, $H = 50$ mm.

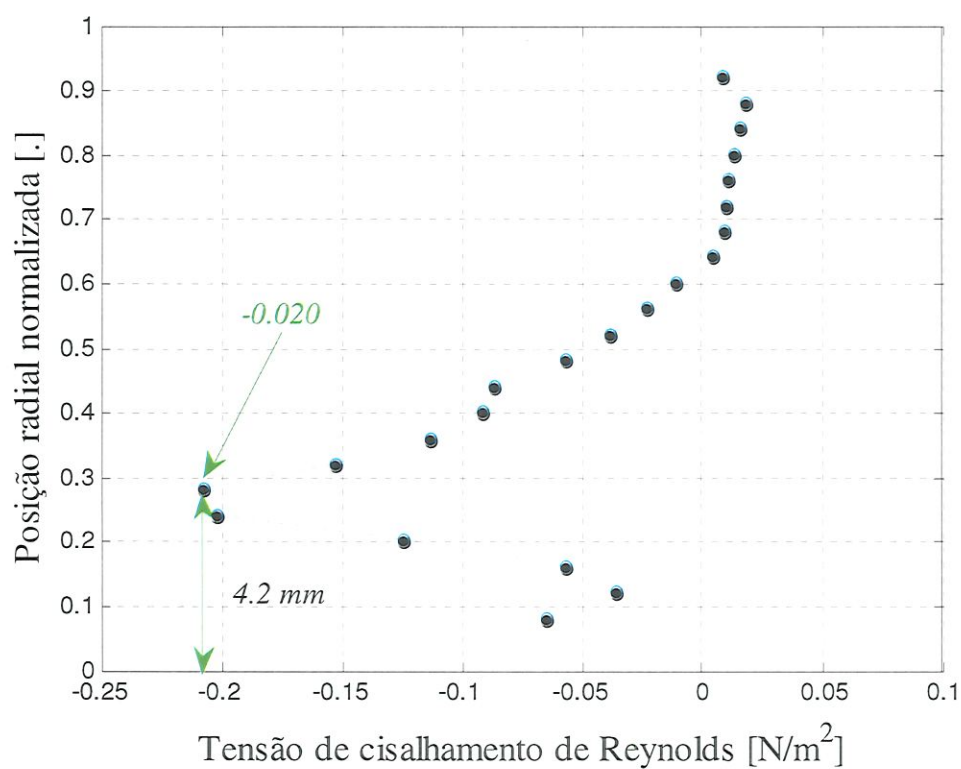


Figura 5.47. Tensão de cisalhamento de Reynolds para escoamento estratificado, $H = 100$ mm.

Semelhantemente ao estratificado com altura na interface de 50 mm, o estratificado com altura de interface de 100 mm apresenta um pico de maior magnitude perto da parede do tubo externo do duto anular, a uma distância de 4,2 mm, com valor de -0.20 N/m^2 ver Figura 5.47. Diferentemente do perfil turbulento da Figura 5.34, em que as tensões apresentam certa simetria.

Alguns pontos devem ser ressaltados nas Figura 5.46 e Figura 5.47. Há grandes diferenças observadas em relação aos perfis das tensões cisalhantes para os escoamentos turbulentos monofásicos. Não são observados picos de tensões próximos às duas paredes, como ocorre nos turbulentos monofásicos, somente se vê um pico próximo à parede do tubo externo. Sabe-se que as regiões próximas às paredes são de grande intensidade de turbulência. A falta de um pico próximo à parede do tubo interno indica menor turbulência nessa região. A interface parece funcionar como um amortecedor de energia cinética turbulenta. Vê-se que no estratificado com altura de interface baixa, Figura 5.46, os valores da tensão cisalhante próximo à parede interna são pequenos, enquanto que para o de altura de interface alta, Figura 5.47, são maiores. Devido a uma maior distância para a interface, a energia turbulenta é dissipada em menor escala. Enquanto o perfil para estratificado baixo apresenta valor nulo na região de máxima velocidade ($r \sim 0.5$), o alto apresenta este ponto deslocado para cima do ponto de velocidade máxima do perfil de velocidades, $r \sim 0,6$ para tensão nula e $r \sim 0,5$ para velocidade máxima. As frequências das medições do PIV podem estar pequenas em relação à escala de tempo dos fenômenos turbulentos, dessa maneira, eles não seriam observados corretamente. Além disso, pode haver escoamento secundário na seção transversal que não é medido do PIV, vórtices contra rotativos e intermitentes fariam com que o escoamento não fosse simétrico. Tanto a escala de tempo dos fenômenos turbulentos quanto o escoamento na seção transversal podem explicar o valor não nulo de tensão cisalhante no mesmo ponto de velocidade máxima para o escoamento estratificado alto.

Tabela 5.9. Principais características para escoamento estratificado, valores das velocidades de flutuação axial e radial.

<i>Escoamento</i>	<i>Número de Reynolds</i>	<i>Altura da interface Estratificado</i>	<i>Velocidade média PIV [m/s]</i>	<i>Velocidade máxima [m/s] PIV</i>	<i>U_{rms} Máximo [m/s]</i>	<i>U_{rms} Mínimo [m/s]</i>	<i>% U_{rms} Mínimo vs velocidade média PIV</i>	<i>% U_{rms} Máximo vs velocidade média PIV</i>	<i>V_{rms} Máximo [m/s]</i>	<i>V_{rms} Mínimo [m/s]</i>	<i>% V_{rms} Mínimo vs velocidade média PIV</i>	<i>% V_{rms} Máximo vs velocidade média PIV</i>	<i>Ponto máximo da tensão de cisalhamento de Reynolds [N/m^2]</i>
Estratificado	1836	50 mm	0.07	0.09	0.01	0.003	4.28	14.28	0.008	0.0016	1.24	6.38	-0.042 em 3.75 mm.
Estratificado	3888	100 mm	0.13	0.15	0.03	0.011	19	45	0.01	0.0018	1.36	11.25	-0.31 em 4.2 mm

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

As medições de escoamento monofásico em um tubo horizontal apresentaram boa concordância com a teoria clássica da velocidade axial média local, com o perfil de velocidades de Hagen-Poiseuille, exceto em regiões próximas da parede, dentro de 0,6 mm de distância, onde alguma refração está presente no experimento. No duto anular e no tubo horizontal, o pico na distribuição da tensão de cisalhamento de Reynolds mostra a dependência do número de Reynolds.

No escoamento turbulento monofásico de água do duto anular, a velocidade máxima é observada em torno da região central do anel, mais próxima do tubo interno. Como no escoamento do tubo, as flutuações da velocidade radial foram inferiores do que no sentido axial. As figuras mostraram que os pontos de desvio máximo estavam próximos das paredes, para os escoamentos turbulentos em tubo e duto anular analisados.

Para o escoamento bifásico ar-água disposto no padrão pistonado em um duto anular concêntrico, inclinado 5 graus para cima, estudado através de PIV, novos perfis de velocidade foram obtidos no plano vertical diametral na região inferior do duto anular. Os perfis têm formas diferentes em posições diferentes em relação ao nariz da bolha, onde escoamento reverso da água (*back flow*) foi observado. O comportamento complexo dos perfis de velocidade em função do espaço e do tempo deve ter um efeito nas tensões de cisalhamento e, portanto, na queda de pressão. Até onde chega o conhecimento deste autor, esta informação não está disponível na literatura aberta e é de maior importância para o desenvolvimento de códigos numéricos visando o desenvolvimento de modelos de predição de queda de pressão em duas fases em dutos anulares concêntricos.

Para as flutuações das velocidades $U_{rms}(u')$ and $V_{rms}(v')$, maiores discrepâncias são encontradas na região próxima à parede, devido à diferença nos índices de refração, que produz reflexões e distorções das imagens e à presença de maiores gradientes de velocidade. A intensidade mínima de turbulência é observada no centro do tubo $r = 0,5$. Os resultados da turbulência mostram que as flutuações na horizontal (axial, $U_{rms}(u')$) são maiores do que as flutuações na vertical (radial, $V_{rms}(v')$), em todos os pontos máximos de u' , representando

50% na posição do nariz e próxima ao nariz, e nas posições como: meio da bolha representa 71%, seguida por 57% entre o meio e cauda e por último na cauda representa um 66%.

Foi projetado e construído um sensor de impedância elétrica do tipo malha de fios para um duto de geometria anular (AWMS) capacitiva e resistiva, para estudar o escoamento bifásico ar-água disposto no padrão pistonado em um duto anular concêntrico inclinado 5 graus para cima. Com a ajuda de gravação de vídeo de alta velocidade e velocimetria de imagem de partículas (PIV), dados da fração vazia em função do tempo foram coletados e, com eles, a densidade espectral de potência (PSD) foi calculada usando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). As frequências dominantes e os picos de potência em função das condições do escoamento foram obtidos: quanto maior a vazão de ar, menor a frequência dominante de passagem de bolhas e maior a potência.

Novos dados de velocidade de bolha foram obtidos usando duas técnicas: vídeo de câmera em alta velocidade e AWMS junto com PIV. Os sensores foram sincronizados para que eles começassem a gravar ao mesmo tempo, durante o mesmo período e na mesma taxa de amostragem (100 Hz). Em geral, as duas técnicas obtiveram resultados próximos, com diferenças menores que 10%. O sincronismo possibilitou a visualização dos efeitos das bolhas no escoamento abaixo delas. Os perfis de velocidade sofrem mudanças e as velocidades médias em cada seção também variam. A velocidade média máxima é observada na região do nariz da bolha, enquanto a mínima é próxima ao meio da bolha (não exatamente no meio, dependendo de cada bolha). O perfil de velocidade do pistão na região inferior do duto anular comporta-se quase como se fosse um escoamento de água monofásico, não apenas em forma, mas também em magnitude, de modo que ele tenha valores mais altos do que os observados abaixo da bolha. A velocidade do pistão no lado superior do duto não foi medida (o laser apenas iluminou a região inferior), mas espera-se que a água viaje mais rápido, pelo seguinte motivo: a vazão de água é constante ao longo do tempo. A única maneira de mantê-la constante é ter velocidades mais elevadas na região superior do duto anular. Esta diferença de velocidades pode ser explicada analisando a pressão em cada região. À medida que a bolha passa, a pressão alta deve ser vista no nariz enquanto baixa pressão em sua cauda, causando velocidades mais elevadas na região superior, para o pistão.

Os escoamentos estratificados, obtidos na segunda geometria, são mais complexos que os monofásicos, porém menos que os pistonados, por não apresentarem um caráter intermitente. Duas medições neste padrão foram feitas, com altura de interface distinta,

apontando as diferenças presentes entre os perfis de velocidade, já que um deles foi laminar e o outro turbulento e as semelhanças e diferenças com os monofásicos.

Nas características das tensões de cisalhamento de Reynolds e flutuações da velocidade axial e radial, não são simétricas devido ao grande impacto causado pela interface, parecendo funcionar como um amortecedor de energia cinética turbulenta e apresentando escoamento secundário na seção transversal que não é medido do PIV, vórtices contra rotativos e intermitentes fariam com que o escoamento não fosse simétrico. Tanto a escala de tempo dos fenômenos turbulentos quanto o escoamento na seção transversal podem explicar o valor não nulo de tensão cisalhante no mesmo ponto de velocidade máxima para o escoamento estratificado alto.

No escoamento estratificado nova geometria se conseguiram perfis semelhantes a os perfis laminar e turbulento com duas alturas na interfase alta 100 mm e baixa 50 mm. Fazendo uma comparação com o perfil laminar com as velocidades médias do perfil estratificado das representam um 46 % e 23 % da velocidade média do perfil laminar, respectivamente.

Perspectivas futuras

- Obtenção do perfil de velocidade segundo o comprimento da bolha, menor médio e maior, para calcular os perfis de velocidades e estatísticas de turbulência e fazer uma comparação com a análise feita no presente texto.
- Comparar os resultados do cálculo de perfil de velocidade com simulação numérica.
- Realizar PIV 3D duas câmeras, para estudar melhor o escoamento bifásico pistonado e estratificado.
- Tentar calcular a velocidade da bolha com PIV colocando o tubo interno em vidro.
- Fazer uma varredura angular do PIV com o propósito de analisar os perfis em diferentes posições do duto anular.
- Levantamento dos perfis de velocidade com uma geometria assimétrica conservando os mesmos diâmetros de tubo interno e externo.

Referências

- ALMEIDA, J. A. **Sistemas de Velocimetria por Imagem de Partículas**. Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica: PUC Rio, 1997.
- AYATI, A. A. et al. A PIV investigation of stratified gas-liquid flow in a horizontal pipe. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 61, p. 129–143, 2014.
- AYATI, A. A. et al. Combined simultaneous two-phase PIV and interface elevation measurements in stratified gas/liquid pipe flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 74, p. 45–58, 2015.
- AZEVEDO, L. F.; J. A. Almeida. **Velocimetria por imagem de partículas**, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RIO, 2002.
- BAKER, O. Simultaneous Flow of Oil and Gas. **Oil and Gas Journal**, v. 53, n. 12, p. 183–195, 1954.
- DELMÉE, G. J. Manual de medição de vazão. 3º Edição. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.
- BARNEA, D.; TAITEL, Y. **Flow pattern transition in two-phase gas-liquid flows** *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, 1986.
- BELT, R. J. et al. Time and spatially resolved measurements of interfacial waves in vertical annular flow. **International journal of multiphase flow**, v. 36, n. 7, p. 570–587, jul. 2010.
- BIRD, A. G. F.; Friction Factors H. B. in Not-Newtonian Annular Flow. **Industrial and engineering Chemistry**, v. 50, p. 1599, 1958.
- BIRVALSKI, M. et al. PIV measurements of waves and turbulence in stratified horizontal two-phase pipe flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 62, p. 161–173, jun. 2014.
- BIRVALSKI, M.; TUMMERS, M. J.; HENKES, R. A. W. M. Measurements of gravity and gravity-capillary waves in horizontal gas-liquid pipe flow using PIV in both phases. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 87, p. 102–113, 2016.
- BOERSMA, B. J. Direct numerical simulation of turbulent pipe flow up to a Reynolds number of 61,000. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 318, n. 4, p. 42045, 2011.
- BONDET, E. et al. Low (10–800 MHz) and high (40 GHz) frequency probes applied to petroleum multiphase flow characterization. **Measurement Science and Technology**, v. 19, n. 5, p. 55602, maio 2008.
- BOUSSINESQ, J. Mem. Pres. Acad. Set, Paris, **23**, p. 46. 1877.
- BRIGHTON, J. A.; JONES, J. B. Fully developed turbulent flow in annuli. **Transaction ASME Journal of Basic Engineering**, v. 86, n. December 1964, p. 835–844, 1964.
- CAETANO, E. F.; SHOHAM, O.; BRILL, J. P. Upward Vertical Two-Phase Flow Through an Annulus Part I: Single-Phase Friction Factor, Taylor Bubble Rise Velocity, and Flow

Pattern Prediction. **Journal of Energy Resources Technology**, v. 114, p. 1, 1992.

CARR, Z. R.; AHMED, K. A.; FORLITI, D. J. Spatially correlated precision error in digital particle image velocimetry measurements of turbulent flows. **Experiments in Fluids**, v. 47, n. 1, p. 95–106, 2009.

CHIN, C. et al. Turbulent pipe flow at $Re\tau \approx 1000$: A comparison of wall-resolved large-eddy simulation, direct numerical simulation and hot-wire experiment. **Computers and Fluids**, v. 122, p. 26–33, 2015.

CHRISTENSEN, K. T. The influence of peak-locking errors on turbulence statistics computed from PIV ensembles. **Experiments in Fluids**, v. 36, n. 3, p. 484–497, 2004.

DA SILVA, M. J. **Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging**. [s.l.] TUDpress, 2008.

DAMSOHN, M.; PRASSER, H.-M. High-speed liquid film sensor for two-phase flows with high spatial resolution based on electrical conductance. **Flow measurement and instrumentation**, v. 20, n. 1, p. 1–14, mar. 2009a.

DAMSOHN, M.; PRASSER, H.-M. High-speed liquid film sensor with high spatial resolution. **Measurement science & technology**, v. 20, n. 11, nov. 2009b.

DAS, G. et al. Gas Liquid Upflow Through Vertical Concentric Annuli — Part I: Experimental. **Journal of Fluids Engineering ASME**, v. 121, n. December 1999, p. 2–8, 1999.

DAS, G. et al. Phase distribution of gas-liquid mixtures in concentric annuli-inception and termination of asymmetry. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 26, n. 5, p. 857–876, 2000.

DEN TOONDER, J. M. J.; NIEUWSTADT, F. T. M. Reynolds number effects in a turbulent pipe flow for low to moderate Re . **Phys. Fluids**, v. 9, n. June, p. 3398, 1997.

DUKLER, A. E. Gas-liquid flow in inclined tube: flow pattern transitions for upward flow. **Chemical Engineering Science**, v. 40, p. 131–134, 1985.

DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes. v. 14, n. May, p. 337–347, 1975.

EGGELS, J. G. M. et al. Fully developed turbulent pipe flow: a comparison between direct numerical simulation and experiment. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 268, n. 1, p. 175, 1994.

EGGELS, J.; UNGER, F. Fully developed turbulent pipe flow: a comparison between direct numerical simulation and experiment. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 268, n. March 2016, p. 175–209, 1994.

EKBERG, N. P. et al. Gas - liquid two-phase flow in narrow horizontal annuli. **Nuclear Engineering and Design**, v. 192, n. 1, p. 59–80, 1999.

ELSETH, G. An Experimental Study of Oil / Water Flow in Horizontal Pipes Department of Technology (HiT-TF) Telemark University College Kjølnes Ring , N-3914 Porsgrunn. n.

1301, p. 270, 2001.

ELSINGA, G. E. et al. Tomographic particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, v. 41, n. 6, p. 933–947, out. 2006.

ENGLART, S.E.; SHENG, Z.; KIRLIN, R. L. Crosscorrelation of Synthesized Digital Image Pairs for Determination of Velocity Vectors Fields Associated with Fluid Flow About a Cylinder". **Flow Visualization – ASME Winter Annual Meeting**, p. pp.3., 1989.

ESCUDIER, M. P.; GOULDSON, I. W.; JONES, D. M. Flow of shear-thinning fluids in a concentric annulus. **Experiments in Fluids**, v. 18, n. 4, p. 225–238, 1995.

CLAUSER F. H. The Turbulent Boundary Layer. **Advances in Applied Mechanics**, v. 4, n. 1–51, p. 1956, 1956.

FERNANDES, R. C., SEMIAT, R., DUKLER, A. E. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, v. 29, n. 6, p. 981–989, 1983.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. R. **Digital image processing** (P. Hall, Ed.)New Jersey, 2002.

HASSAN, Y. A. et al. Simultaneous velocity measurements of both components of a two-phase flow using particle image velocimetry. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 18, n. 3, p. 371–395, maio 1992.

HERNÁNDEZ, L. et al. Flow Regime Identification in Boiling Two-Phase Flow in a Vertical Annulus. **Journal of Fluids Engineering ASME**, v. 133, n. 9, p. 1–10, 2011.

HEWITT, G. F.; ROBERTS, D. N. **Studies of two-phase flow patterns by simultaneous x-ray and flash photography**. Harwell (England): United Kingdom, 1969.

HÖHNE, T.; KLIEM, S.; BIEDER, U. Modeling of a buoyancy-driven flow experiment at the ROCOM test facility using the CFD codes CFX-5 and Trio_U. **Nuclear Engineering and Design**, v. 236, n. 12, p. 1309–1325, jun. 2006.

J. E. WULKER, G. A. WHUN, AND R. R. R. Fluid Friction in Noncircular Ducts. **AIChE Journal**, v. 3, n. 3, p. 484–489, 1957.

JAWOREK, A.; KRUPA, A. Phase-shift detection for capacitance sensor measuring void fraction in two-phase flow. **Sensors and Actuators A-Physical**, v. 160, n. 1–2, p. 78–86, 2010.

JOHNSON, I. D. **Method and apparatus for measuring water in crude oil**US, 1987.

JULIA, J. E. et al. Axial Development of Flow Regime in Adiabatic Upward Two-Phase Flow in a Vertical Annulus. **ASME Trans. J. Fluids Eng**, v. 131, n. 2, p. 1–28, 2009.

JULIA, J. E.; HIBIKI, T. Flow regime transition criteria for two-phase flow in a vertical annulus. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 32, n. 5, p. 993–1004, 2011.

KNUDSEN, J. A.; KATZ, D. L. Velocity Profiles in Annuli. **Proceeding of the Midwestern Conference on Fluid Dynamics**, p. 175–203, 1950.

KAYS, W. M.; CRAWFORD, M. E.; WEIGAND, B. **Convective Heat and Mass Transfer** (Mcgraw-Hill, Ed.), 2005.

- KELESSIDIS, V. C.; DALAMARINIS, P.; MAGLIONE, R. Experimental study and predictions of pressure losses of fluids modeled as Herschel-Bulkley in concentric and eccentric annuli in laminar, transitional and turbulent flows. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 77, n. 3–4, p. 305–312, 2011.
- KELESSIDIS, V. C.; DUKLER, A. E. Modeling flow pattern transitions for upward gas-liquid flow in vertical concentric and eccentric annuli. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 15, n. 2, p. 173–191, 1989a.
- KELESSIDIS, V. C.; DUKLER, A. E. Modeling flow pattern transitions for upward gas-liquid flow in vertical concentric and eccentric annuli. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 15, n. 2, p. 173–191, abr. 1989b.
- KELESSIDIS, V. C.; DUKLER, A. E. Motion of large gas bubbles through liquids in vertical concentric and eccentric annuli. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 16, n. 3, p. 375–390, 1990.
- KODAL S. L.; STANISLAV, J. F. An experimental study of two-phase flow in slightly inclined pipes-ii. liquid holdup and pressure drop. **Chemical Engineering Journal**, v. 44, n. 6, p. 681–693, 1989.
- KUMARA, W. A. S. et al. Comparison of Particle Image Velocimetry and Laser Doppler Anemometry measurement methods applied to the oil-water flow in horizontal pipe. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 21, n. 2, p. 105–117, 2010.
- KUMARA, W. A. S.; HALVORSEN, B. M.; MELAAEN, M. C. Particle image velocimetry for characterizing the flow structure of oil-water flow in horizontal and slightly inclined pipes. **Chemical Engineering Science**, v. 65, n. 15, p. 4332–4349, 2010.
- LAUFER, J. The structure of turbulence in fully developed pipe flow. **NACA report 1174**, p. 1954, 1954.
- LIU, X.; CHEN, Y.; SHI, M. Influence of gravity on gas-liquid two-phase flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 41, p. 23–35, maio 2012.
- LOULOU, P. et al. Direct Numerical Simulation of Incompressible Pipe Flow Using a B-Spline Spectral Method. **NASA Technical Memorandum**, n. February, 1997.
- MANDHANE, J. M.; GREGORY, G. A.; AZIZ, K. A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 1, n. 55, p. 537, 1974.
- MCDONALD, R. W. F. AND A. T. R. W. Fox and A. T. McDonald, “Introdução à Mecânica dos Fluidos,” Editora Guanabara S.A., 3^oed, 632 p. , 1996. p. 1996, 1996.
- MEINHART, C. D.; WERELEY, S. T.; SANTIAGO, J. G. PIV measurements of a microchannel flow. **Experiments in Fluids**, v. 27, n. 5, p. 414–419, out. 1999.
- MENDES, F. A. A. Estudo experimental, simulação numérica e modelagem fenomenológica da separação gravitacional de gás no fundo de poços direcionais. p. 250, 2012.
- MENG, W. H. et al. Experimental study of low-liquid-loading gas-liquid flow in near-horizontal pipes. **SPE Production & Facilities, Richardson**, v. 16, p. 240–249, 2001.
- MERLE C. POTTER.; DAVID C.; WIGGERT, B. R. **Mechanics of Fluids** (Cengage

Learning, Ed.) Stamford, USA, 2012.

MEYER, K. E.; WESTERWEEL, J. Advection velocities of flow structures estimated from particle image velocimetry measurements in a pipe. **Experiments in Fluids**, v. 29, n. SUPPL. 1, 2000.

MOSER, R. D. et al. Direct numerical simulation of turbulent channel flow up to $Re_{\tau} = 590$. **Physics of Fluids**, v. 11, n. October, p. 943, 1999.

MUÑOZ I. J. Velocimetría PIV en tiempo real basada en lógica programable FPGA. p. 87, 2008.

MUNSON, D. F.; YOUNG, T. H. O. **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos** (Ü. Ltda, Ed.), 2004.

NICHOLSON, M. K.; AZIZ, K.; GREGORY, G. A. Intermittent Two Phase Flow in Horizontal Pipes - Predictive Models. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 56, n. 6, p. 653–663, 1978.

OLIEMANS, R. V. A. **The lubricating-film model for core-annular flow**. Delft Universitu of Technologic, Netherlands.: Ph.D. Thesis, Technische Hogeschool Felft., 1986.

OLIVEIRA, A. C.; VIEIRA J.W. **Implementação da FFT para processamento de imagens digitais usadas na construção de fantasmas de voxels**. III Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. **Anais.Fortaleza - CE -**: 2008

OZALP, C. et al. PIV measurements of flow through a sudden contraction. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 18, n. 3–4, p. 121–128, 2007.

OZAR, B. et al. Flow structure of gas-liquid two-phase flow in an annulus. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 15, p. 3998–4011, 2008.

PALACIOS S. F. M. **Estudo experimental do escoamento de fluido newtoniano em contração abrupta axissimétrica com a técnica de velocimetria por imagem de partículas**. [s.l.] Pós- Graduação, dissertação mestrado, do Campus de Curitiba, 2011.

PANTON R. L. **Incompressible Flow**. Fourth Edition. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.

Particle Image Velocimetry in Aerodynamics: Technology and Applications in Wind Tunnels. **Society**, v. 2, p. 229–244, 2000.

PEIXINHO, J. et al. Laminar transitional and turbulent flow of yield stress fluid in a pipe. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 128, n. 2–3, p. 172–184, 2005.

PEREIRA, F.; GHARIB, M. Defocusing digital particle image velocimetry and the three-dimensional characterization of two-phase flows. **Measurement Science and Technology**, v. 13, n. 5, p. 683–694, maio 2002.

PRASSER, H.-M.; BÖTTGER, A.; ZSCHAU, J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows. **flow measurement and instrumentation**, v. 9, n. 2, p. 111–119, jun. 1998.

PRUVOST, J. et al. Particle image velocimetry investigation of the flow-field of a 3D turbulent annular swirling decaying flow induced by means of a tangential inlet. **Experiments in Fluids**, v. 29, p. 291–301, 2000.

QI, F. S. et al. Classification of bubbles in vertical gas–liquid flow: Part 1 – An analysis of experimental data. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 39, p. 121–134, mar. 2012.

MOISSIS, R.; GRIFFITH J P. Entrance effects in a two-phase slug flow. **J. Heat Transfer**, v. 84, n. 1, p. 29–39, 1962.

ROTHFUA, R. R. **Velocity Distribution and Fluid Friction in Concentric Annuli**. [s.l.] PhD thesis, Carnegie Institute of Technology, 1948., 1948.

RAFFEL, M. et al. **Particle Image Velocimetry A Practical Guide**, 1998.

RODRIGUEZ, I. H. et al. Experiments with a Wire-Mesh Sensor for stratified and dispersed oil-brine pipe flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 70, p. 113–125, 2015.

ROSA, E. S. Flow structure in the horizontal slug flow. **9th brazilian congress of thermal engineering and sciences**, v. 3, n. 2, p. 1–11, 2004.

ROSA, E. S. **flow structure in the horizontal slug flow**. ENCIT 2002, IX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS. **Anais...2002**

SADATOMI, M.; SATO, Y.; SARUWATARI, S. Two-phase flow in vertical noncircular channels. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 8, n. 6, p. 641–655, 1982.

SANTIAGO, J. G. et al. A particle image velocimetry system for microfluidics. **Experiments in Fluids**, v. 25, n. 4, p. 316–319, set. 1998.

SASIC, S.; LECKNER, B.; JOHNSON, F. Characterization of fluid dynamics of fluidized beds by analysis of pressure fluctuations. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 33, n. 5, p. 453–496, 2007.

SCHLICHTING, D. H. **Boundary-Layer-Theory-Schlichting** (McGraw-Hill, Ed.) New York, 1979.

SHAMES. **Mecânica dos Fluidos – Análise de Escoamentos** (Edgard Blucher Ltda, Ed.) Mexico, 1973.

SHOHAM, O. Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes. **Society of Petroleum Engineers**, p. 2006, 2006.

SIHVOLA, A. **Electromagnetic Mixing Formulas and Applications**. The Institution of Engineering and Technology, Michael Faraday House, Six Hills Way, Stevenage SG1 2AY, UK: IET, 1999.

SILVA, M. J.; SCHLEICHER, E.; HAMPEL, U. Capacitance wire-mesh sensor for fast measurement of phase fraction distributions. **Measurement Science and Technology**, v. 18, n. 7, p. 2245–2251, jul. 2007.

SIMÃO, J. G.; RICARDO, A. M.; FERREIRA, R. M. L. **Análise de sensibilidade a medições PIV para a caracterização de escoamentos hidraulicamente rugosos com moderada submersão relativa**. Rio de Janeiro, 2010.

SOARES, R. R. et al. Biospeckle PIV (Particle Image Velocimetry) for analyzing fluid flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 30, p. 90–98, 2013.

SOHRAB, S. S. Experimental study of complex pipe flows. **Technical Reports From**, Roya

institute of technology KTM mechanics. June, 2011.

SPEDDING, P. L.; SPENCE, D. R. Flow regimes in two-phase gas-liquid flow. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 19, n. 2, p. 245–280, abr. 1993.

SUN, X.; KURAN, S.; ISHII, M. Cap bubbly-to-slug flow regime transition in a vertical annulus. **Experiments in Fluids**, v. 37, n. 3, p. 458–464, 2004.

SVENSSON, A.; JOHANSSON, F.; LECKNER, B. Fluidization regimes in non-slugging fluidized beds: The influence of pressure drop across the air distributor. **Powder Technology**, v. 86, n. 3, p. 299–312, 1996.

TAITEL, Y., BARNEA, D. Two-phase slug flow. **Advances, Heat Transfer**, v. 20, p. 83–132, 1990.

TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **AIChE Journal**, 1976.

TOONDER, J. M. J. et al. Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow: numerical and laboratory experiments. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 337, p. 193–231, 1997.

TRIFONOV, Y. Y. Flooding in two-phase counter-current flows: Numerical investigation of the gas-liquid wavy interface using the Navier–Stokes equations. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 36, n. 7, p. 549–557, jul. 2010.

TZOTZI, C.; ANDRITSOS, N. Interfacial shear stress in wavy stratified gas-liquid flow in horizontal pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 54, p. 43–54, set. 2013.

VAN DER SCHAAF, J. et al. Similarity between chaos analysis and frequency analysis of pressure fluctuations in fluidized beds. **Chemical Engineering Science**, v. 59, n. 8–9, p. 1829–1840, 2004.

VAN DOORNE, C. W. H.; WESTERWEEL, J. Measurement of laminar, transitional and turbulent pipe flow using Stereoscopic-PIV. **Experiments in Fluids**, v. 42, n. 2, p. 259–279, 2007.

VEENMAN, M. **Statistical analysis of turbulent pipe flow: A numerical approach**, 2004.

VELASCO PEÑA, H. F. **estudo topológico de escoamento trifásico óleo-água- ar através de sensor de impedância de resposta rápida do tipo “WIRE-MESH”**. [s.l.] Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, 2015.

VELASCO PEÑA, H. F.; RODRIGUEZ, O. M. H. Applications of wire-mesh sensors in multiphase flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 45, p. 255–273, 2015.

VESTØL, S.; MELAAEN, M. PIV and gamma measurements of stratified unprocessed gas flow in a horizontal and near horizontal test pipe. **Multiphase Production Technology**, p. 237–250, 2007.

WALLIS, G. B. **One-dimensional two-phase flow**. Ed. McGraw ed. New York: [s.n.].

WESTERWEEL, J. **Digital Particle Image Velocimetry-Theory and Application**. PhD's Thesis, Delft, Netherlands, Delft University of Technology, 1993.

WESTERWEEL, J. **Efficient Detection of Spurious Vectors in Particle Image Velocimetry Data**: Experiments in Fluids, Vol. 16, pp. 236-247, 1994.

WESTERWEEL, J. **Theoretical Analysis of the Measurement Precision in Particle Image Velocimetry Data**: Experiments in Fluids, Vol. 29, pp. S3-S12, 2000.

WESTERWEEL, J. et al. Measurement of fully-developed turbulent pipe flow with digital particle image velocimetry. **Experiments in Fluids**, v. 20, n. 3, p. 165–177, 1996.

WESTERWEEL, J. **Digital Particle Image Velocimetry Measurement Science and Technology**, 1997a.

WESTERWEEL, J. Fundamentals of digital particle image velocimetry. **Measurement Science and Technology**, v. 8, n. 12, p. 1379–1392, 1997b.

WESTERWEEL, J. On velocity gradients in PIV interrogation. **Experiments in Fluids**, v. 44, n. 5, p. 831–842, 2008.

WESTERWEEL, J.; DABIRI, D.; GHARIB, M. The effect of a discrete window offset on the accuracy of cross-correlation analysis of digital PIV recordings. **Experiments in Fluids**, v. 23, n. 1, p. 20–28, 1997.

WESTERWEEL, J.; ELSINGA, G. E.; ADRIAN, R. J. Particle image velocimetry for complex and turbulent flows. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 45, p. 409–436, 2013.

WESTERWEEL, J.; SCARANO, F. Universal outlier detection for PIV data. **Experiments in Fluids**, v. 39, n. 6, p. 1096–1100, 2005.

WILLERT, C.E. AND GHARIB, M. Digital Particle Image Velocimetry”, Experiments in Fluids. **Experiments in Fluids**, v. 3, p. 181–193, 1991.

WILLERT, C. E.; GHARIB, M. Experiments in Fluids Digital particle image velocimetry. v. 193, p. 181–193, 1991.

WONGWISES, S.; PIPATHATTAKUL, M. Flow pattern, pressure drop and void fraction of two-phase gas-liquid flow in an inclined narrow annular channel. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 30, n. 4, p. 345–354, 2006.

YARIV, A. **Quantum Electronics** New york, 1989.

ZHANG, B. et al. Equal quality distribution of gas-liquid two-phase flow by partial separation method. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 57, p. 66–77, dez. 2013.

ZHU, Y. et al. Image-preprocessing method for near-wall particle image velocimetry (PIV) image interrogation with very large in-plane displacement. **Measurement Science and Technology**, v. 24, n. 12, p. 1–17, 2013.

ZWANZIGER, M.; ROSA, E. S. Verificação experimental de um modelo de célula unitária para escoamentos de gás e líquido em regime de golfadas. 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - ENCIT 2006.

APÊNDICE A. PUBLICAÇÕES SELECIONADAS.

Congressos

“Analysis of the electrical characteristics in multiphase flow through the wire-mesh sensor”
 Proceedings of. ENCIT 2014 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering
 November 10-13, 2014, Belém, PA, Brazil

“PIV measurements of the instantaneous velocities of flow in an annular Duct”. Para a
 I2MTC 2017 IEEE (International Instrumentation and Measurement Technology
 Conference). <http://2017.imtc.ieee-ims.org/>

“Study of fluid-dynamic characteristics of gas-liquid flow in an annular duct through PIV”.
 Para 9th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and
 Thermodynamics. <http://exhft9.org/session-23.html>

*“Characterization of slug flow in annular duct, using High Speed Video Camera, Wire Mesh
 sensor and PIV”*. Para COBEM 2017- 24th ABCM International Congress of Mechanical
 Engineering. <https://eventos.abcm.org.br/cobem2017/>

*“experimental study of stratified dense liquid-gas flow on inclined pipelines using gamma-ray
 densitometry”* Para COBEM 2017- 24th ABCM International Congress of Mechanical
 Engineering

*“Estudo e análise de escoamento monofásico e bifásico gás-líquido em duto anular através
 de PIV”*. Para o XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, no
 tema Fenômenos de Transporte. <http://cobeqic.com.br/br/node/216>.

Revista (Journal)

“Analysis of the electrical characteristics in multiphase flow through the wire mesh sensor”
Engenharia Termica (Thermal Engineering), Vol. 14. No2. December 2015. P. 82-89

Submetido para publicação

*“Study and characterization of gas-liquid slug flow in an annular duct, using high speed
 video camera, wire-mesh sensor and PIV”*. Experimental Thermal and Fluid Science. 2017

APÊNDICE B. ESCOAMENTOS BIFÁSICO AR-ÁGUA PARA PADRÃO PISTONADO NO DUTO ANULAR.

Nas Figuras B1 a B4, a velocidade superficial de ar foi incrementada para, $j_a=0,044$ m/s, gerando velocidades negativas em todos os perfis, exceto no nariz da bolha ($1L_b/10$). Os PDFs da Figura B1 tem boa concentração em torno da velocidade média, em todas as posições. O mesmo fenômeno é observado onde a velocidade diminui do nariz ($1L_b/10$), $U_{mean} = 0.04043$ m/s, a -0.03909 m/s na posição $7 L_b/10$, em seguida, aumentou a -0.009554 m/s na cauda ($9 L_b/10$).

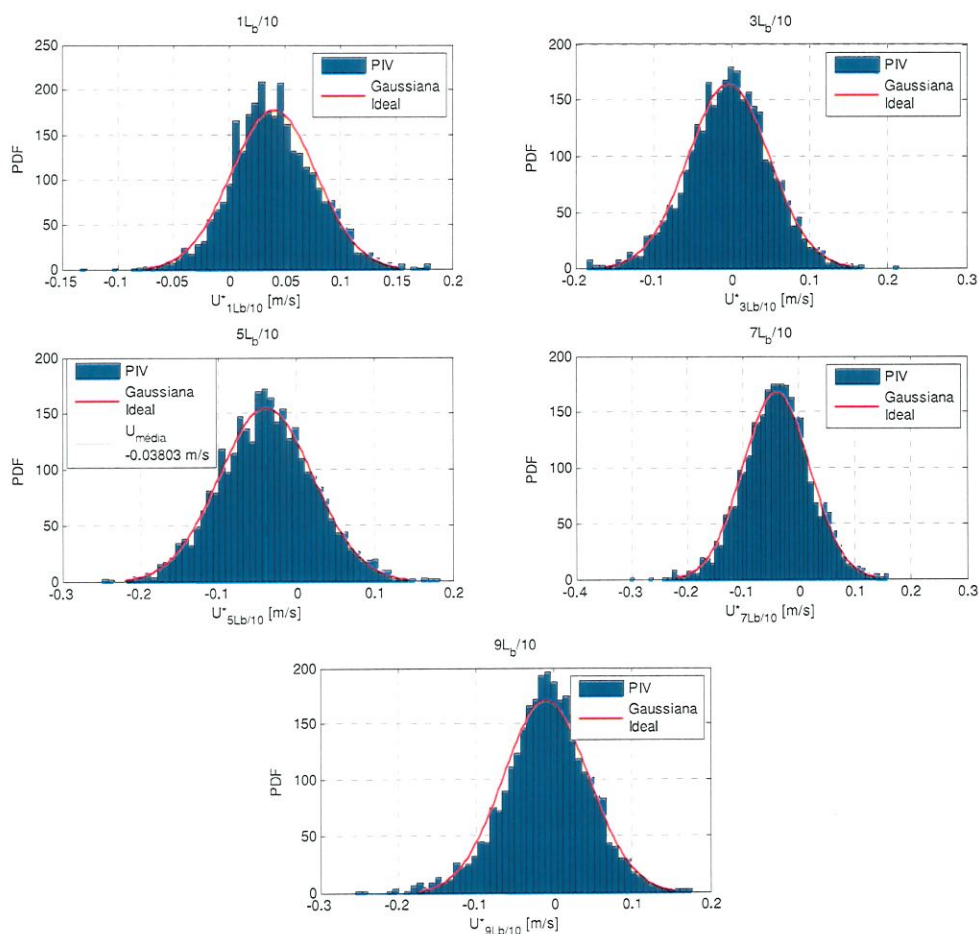


Figura B1. PDF de U_{mean} em várias posições L_b da bolha para, $j_w=0,154$ m/s, $j_a=0,044$ m/s.

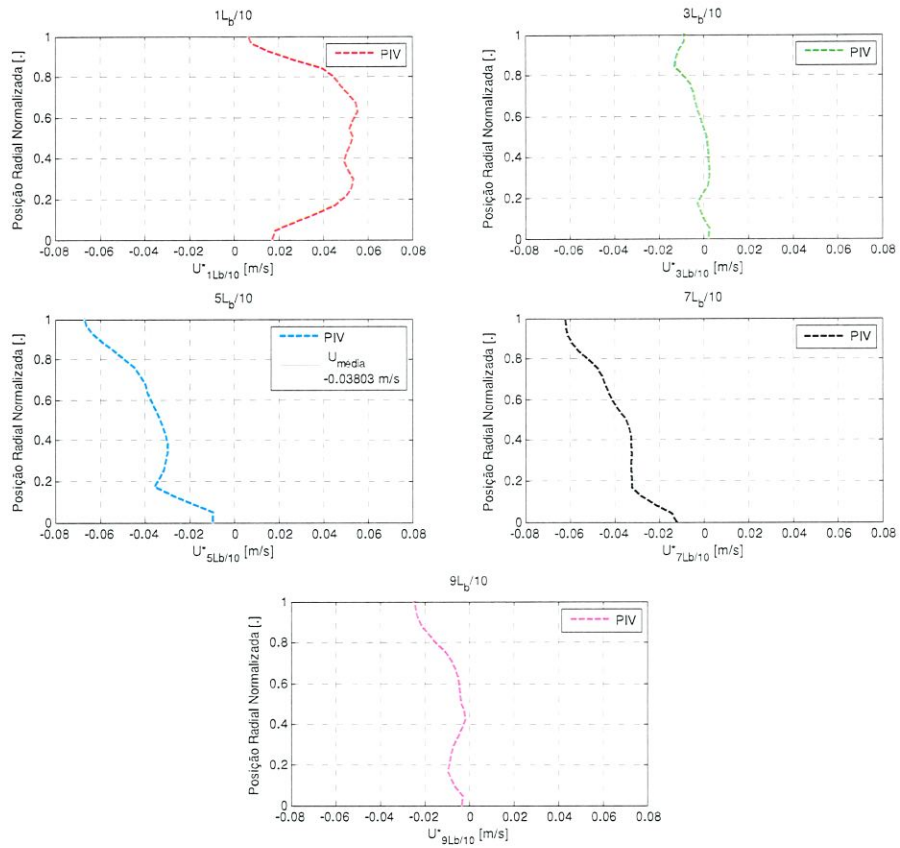


Figura B2. Perfil de velocidade média axial em diferentes posições L_b da bolha para, $j_w=0,154$ m/s, $j_a=0,044$ m/s.

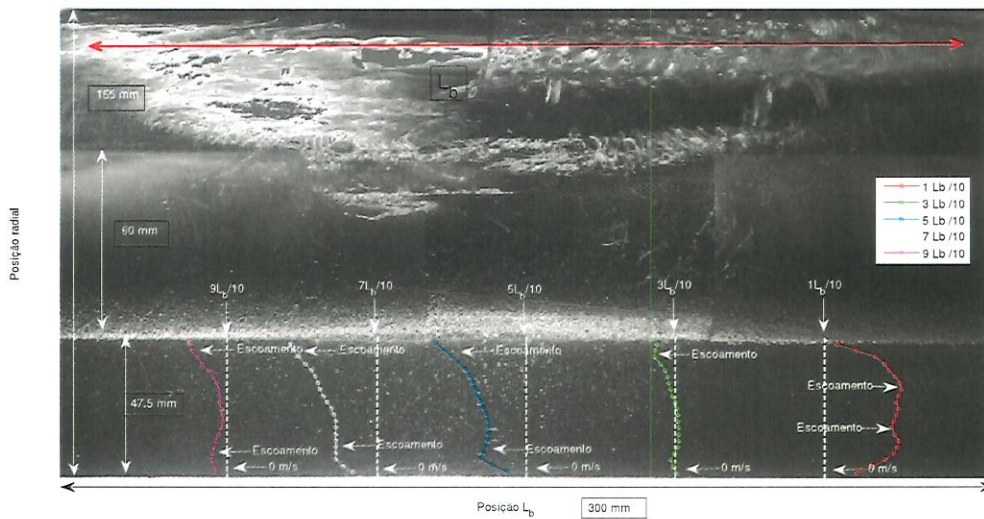


Figura B3. Bolha que atravessa a seção de visualização na parte superior e perfis de velocidade axial médio no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular em diferentes posições em relação ao nariz de bolha para $j_w=0,154$ m/s, $j_a=0,044$ m/s

Quando a velocidade superficial de ar aumenta de $j_a=0,039$ m/s para $j_a=0,044$ m/s, na, aumenta a tensão de cisalhamento de Reynolds, com um pico em $\sim 0,36$ kg/ms² em uma posição radial de $r + \sim 0,54$, na posição da bolha de $1L_b/10$. Além disso, observa-se que as maiores flutuações e tensões de cisalhamento ocorrem perto da parede inferior e superior.

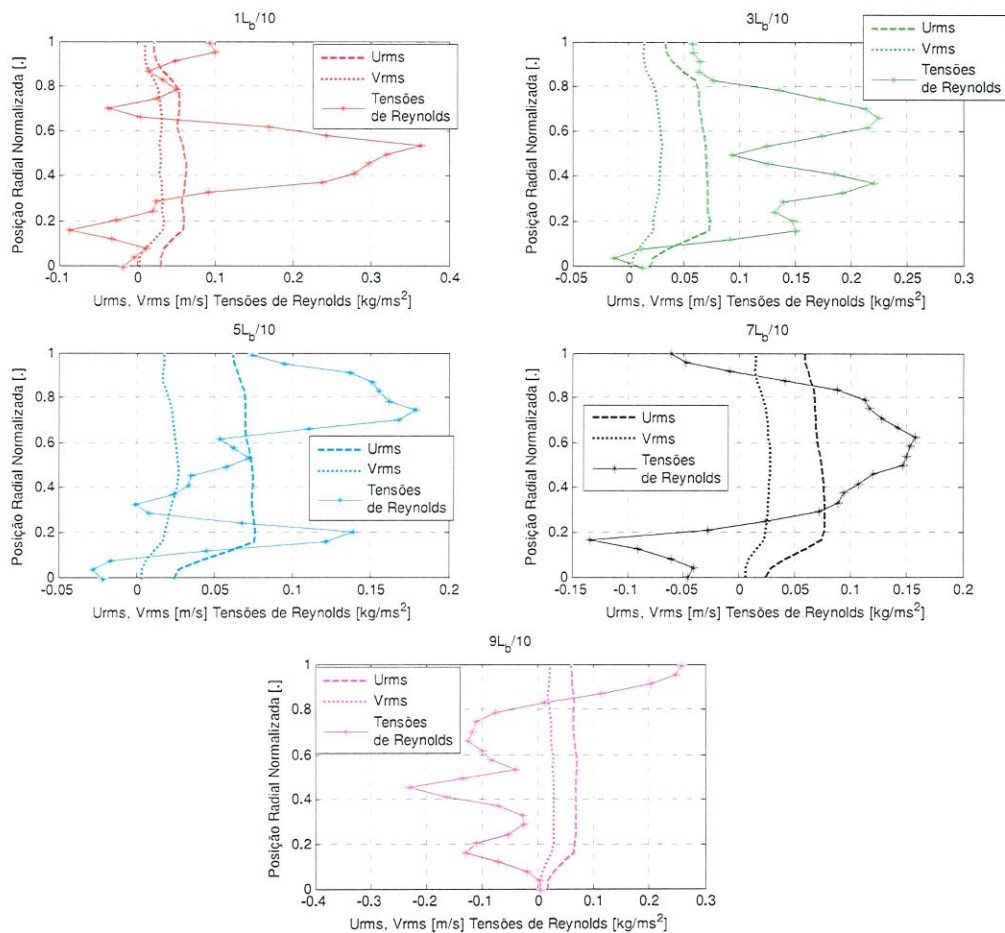


Figura B4. Estatísticas de turbulência U_{rms} , V_{rms} e tensão de cisalhamento de Reynolds para $j_w=0,154$ m/s, $j_a=0,044$ m/s.

Nas Figuras B5 A B6, a velocidade superficial de água foi aumentada para $j_w=0,187$ m/s e velocidade superficial de ar foi diminuída para $j_a=0,036$ m/s. Os PDFs em cada posição, mostram boa concentração ao redor da média, como nos escoamentos anteriores. As velocidades médias em todas as posições são positivas, mas novamente elas diminuem de $0,06916$ m/s no nariz ($1L_b/10$), a $0,02261$ m/s no meio ($5L_b/10$) e depois aumentam até a

cauda ($9 L_b/10$), onde atinge $0,04182 \text{ m/s}$, este fenômeno mostra o grande impacto da bolha no escoamento.

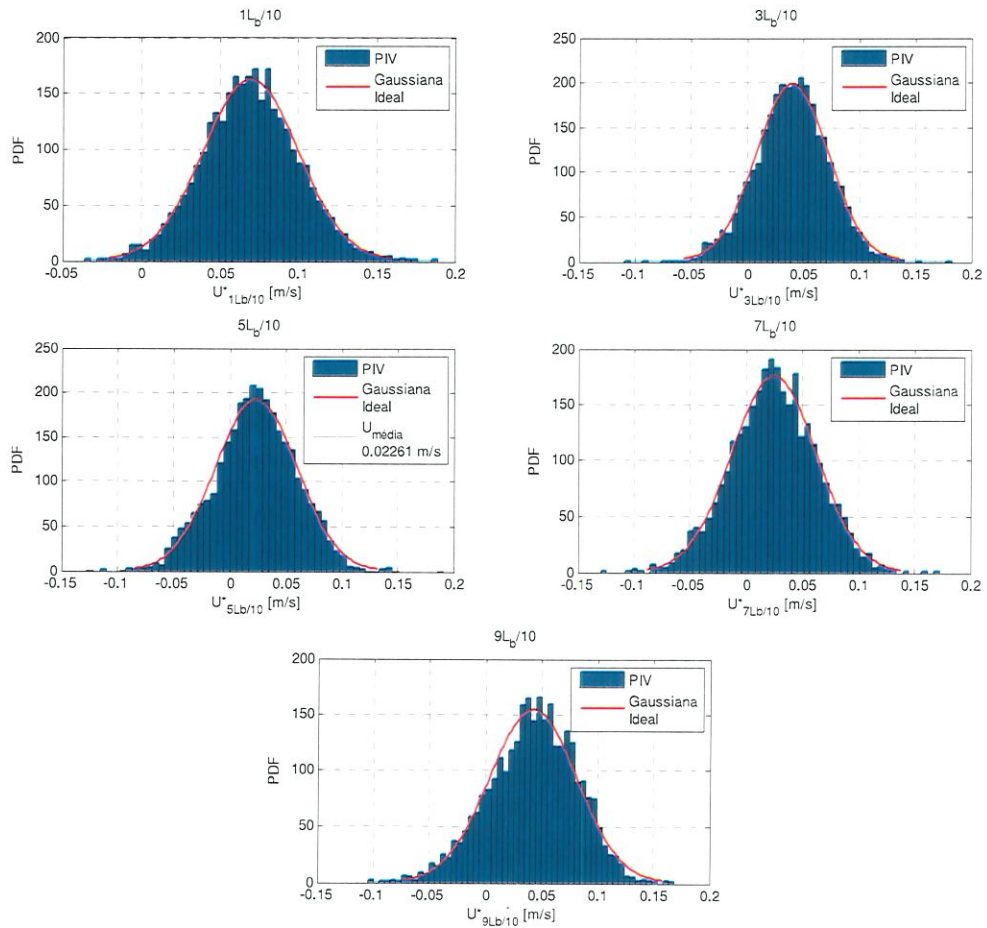


Figura B5. PDF de U_{mean} em várias posições L_b da bolha para $j_w=0,187 \text{ m/s}$, $j_a=0,036 \text{ m/s}$.

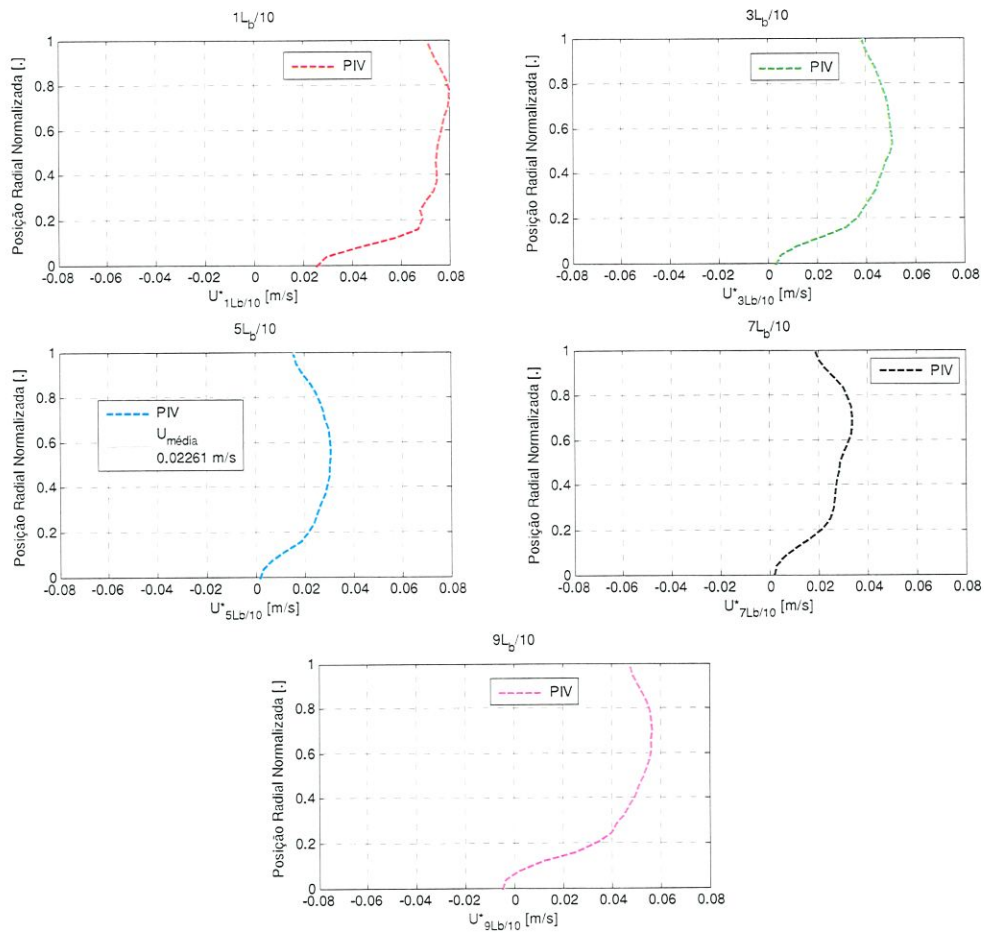


Figura B6. Perfil de velocidade média axial em diferentes posições L_b da bolha para $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,036$ m/s.

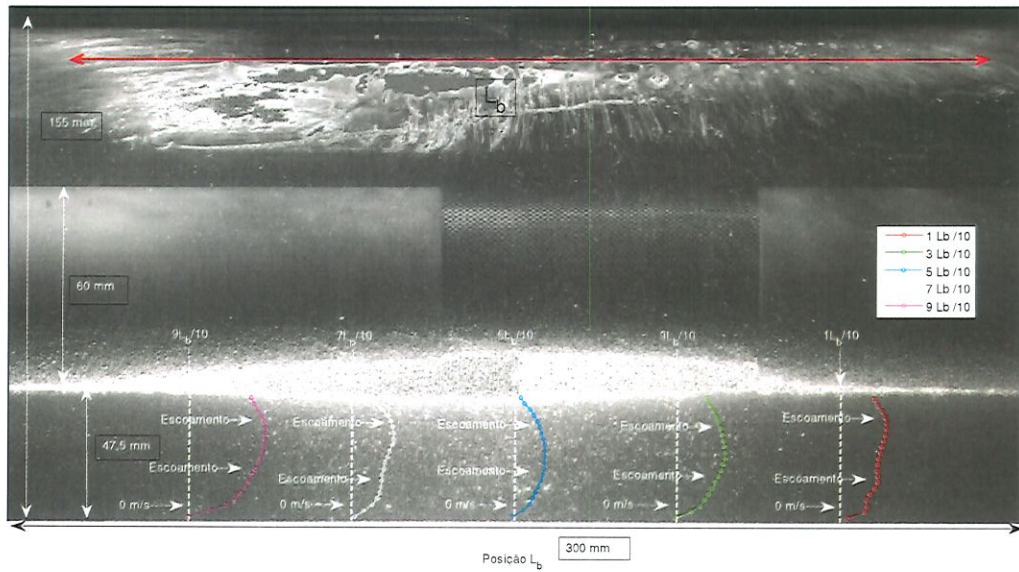


Figura B7. Bolha que atravessa a seção de visualização na parte superior e perfis de velocidade axial média no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular em diferentes posições em relação ao nariz de bolha para $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,036$ m/s.

Nas tensões de cisalhamento de Reynolds, para as velocidades superficiais de $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,036$ m/s, e $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,041$ m/s, das e respectivamente, são observadas tendências similares para a posição $(1L_b/10)$, mas com uma tensão inferior a $0,47$ Kg/ms² para a , e $1,8$ Kg/ms² para a . Nas outras posições da bolha, as maiores flutuações ocorrem perto da parede, mantendo a mais alta tensão de cisalhamento de Reynolds para a velocidade superficial de $j_a=0,041$ m/s.

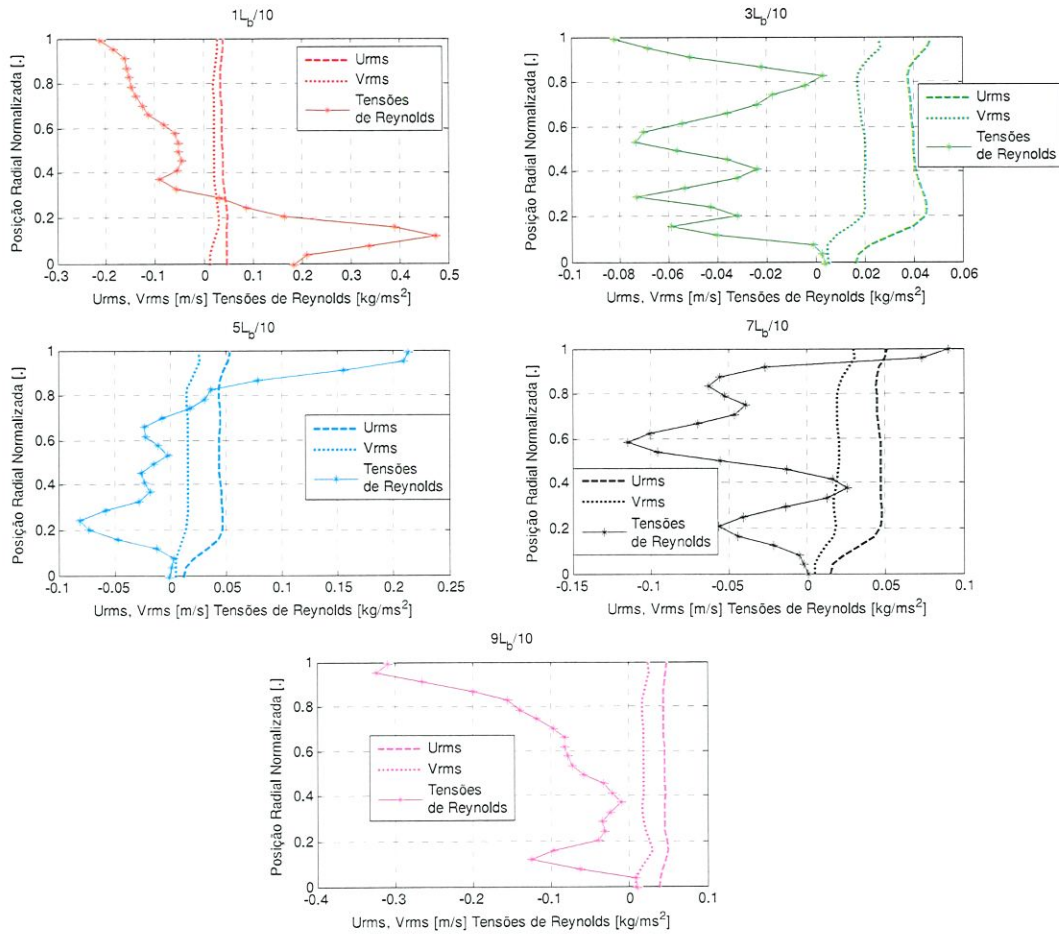


Figura B8. Estatísticas de turbulência U_{rms} , V_{rms} e tensão de cisalhamento de Reynolds para $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,036$ m/s.

Nas Figura B9 a B12, a velocidade superficial de água foi mantida em $j_w=0,187$ m/s e a velocidade superficial de ar foi aumentado para $j_a=0,041$ m/s. O comportamento do perfil de velocidades é semelhante para os escoamentos acima: a velocidade diminui do nariz para o meio e depois aumenta até a cauda da bolha. Mostrando seu mínimo valor na posição $5L_b/10$, equivalente a 0.01711 m/s.

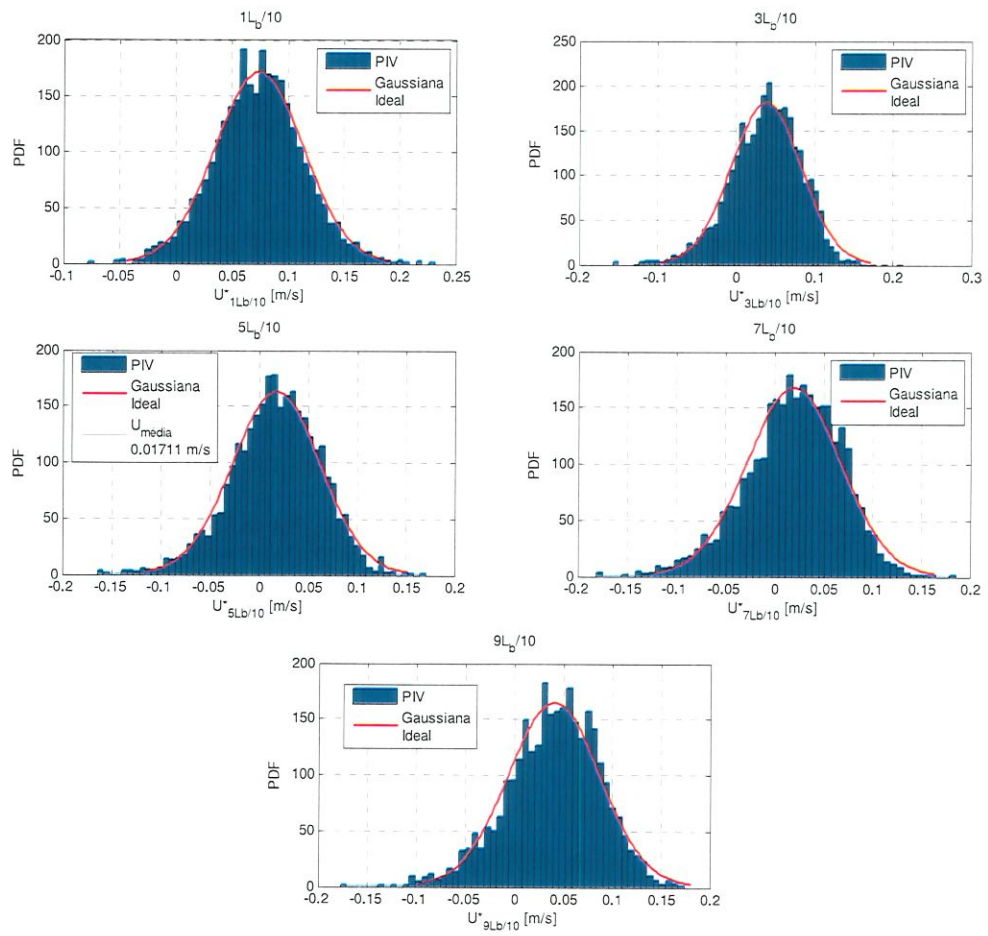


Figura B9. PDF de U_{mean} em várias posições L_b da bolha para $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,041$ m/s.

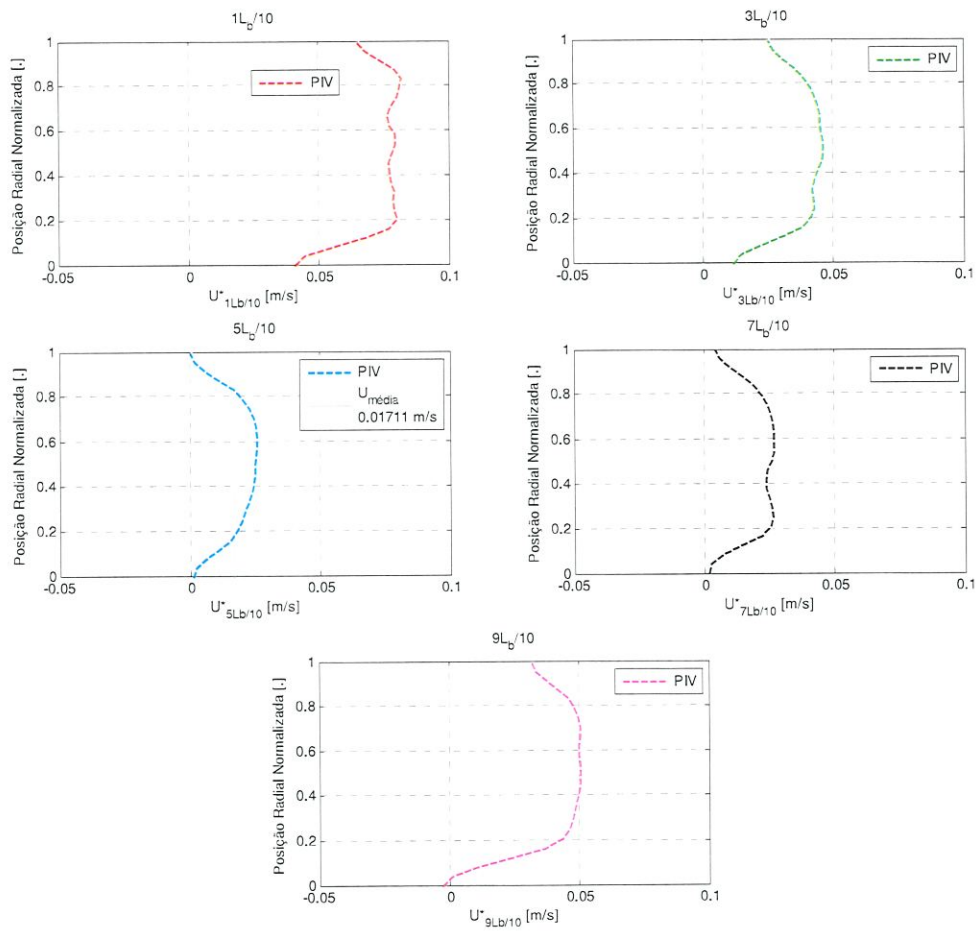


Figura B10. Perfil de velocidade média axial em diferentes posições L_b da bolha para $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,041$ m/s.

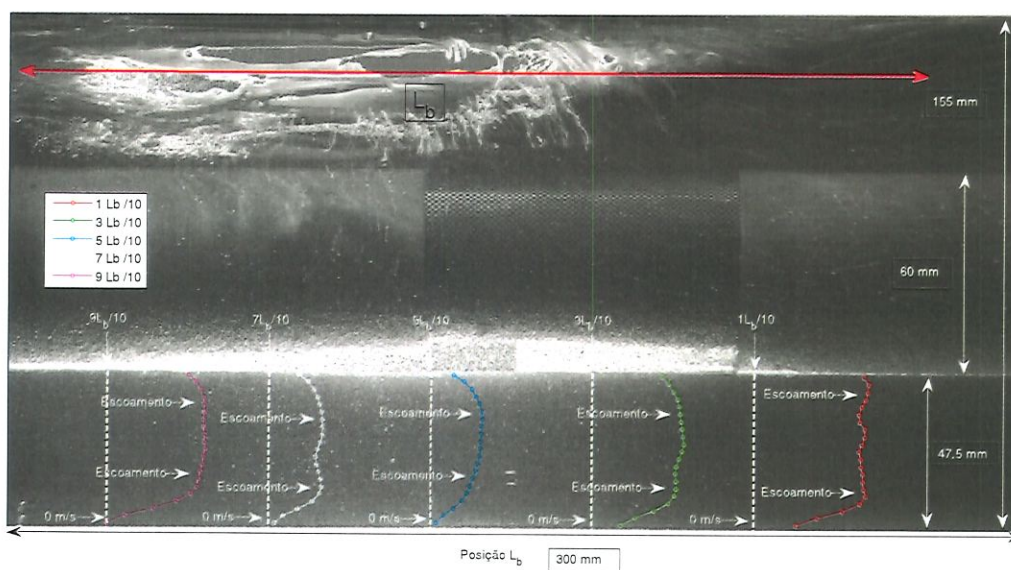


Figura B11. Bolha que atravessa a seção de visualização na parte superior e perfis de velocidade axial média no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular em diferentes posições em relação ao nariz de bolha para $j_w=0,187$ m/s, $j_a=0,041$ m/s.

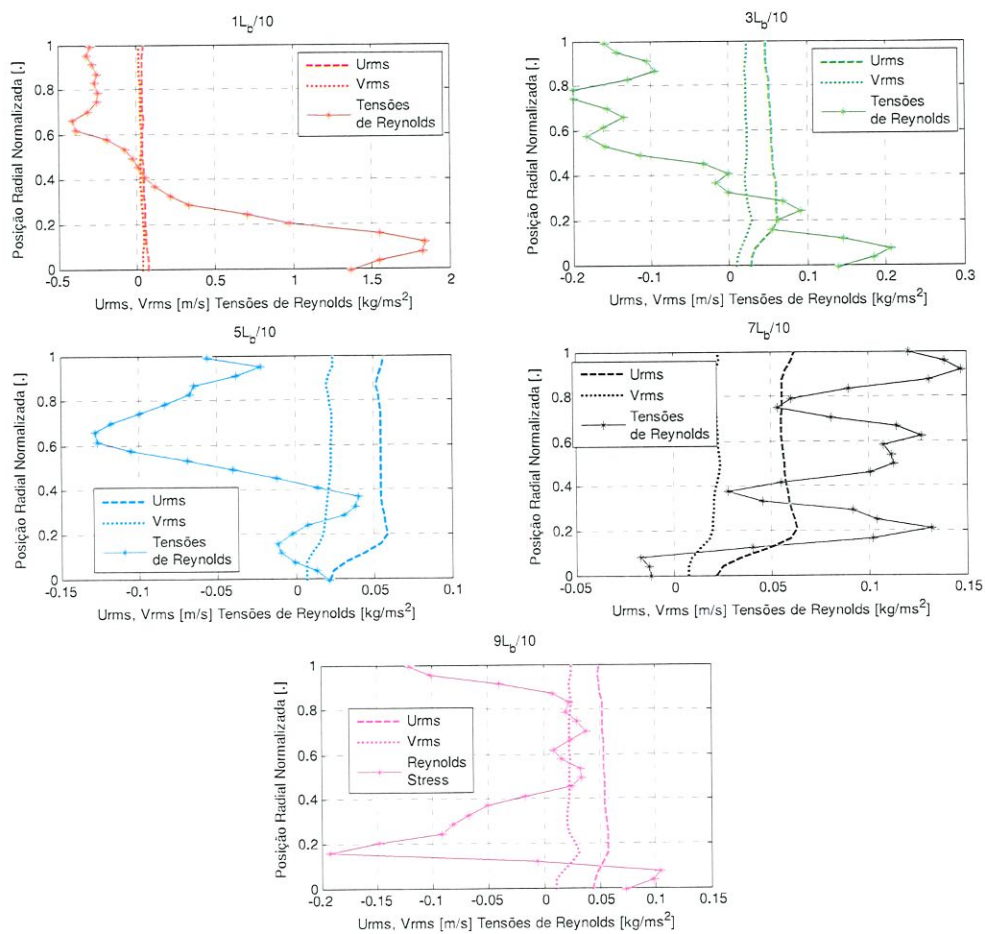


Figura B12. Estatísticas de turbulência U_{rms} , V_{rms} e tensão de cisalhamento de Reynolds para $jw=0,187$ m/s, $ja=0,041$ m/s.

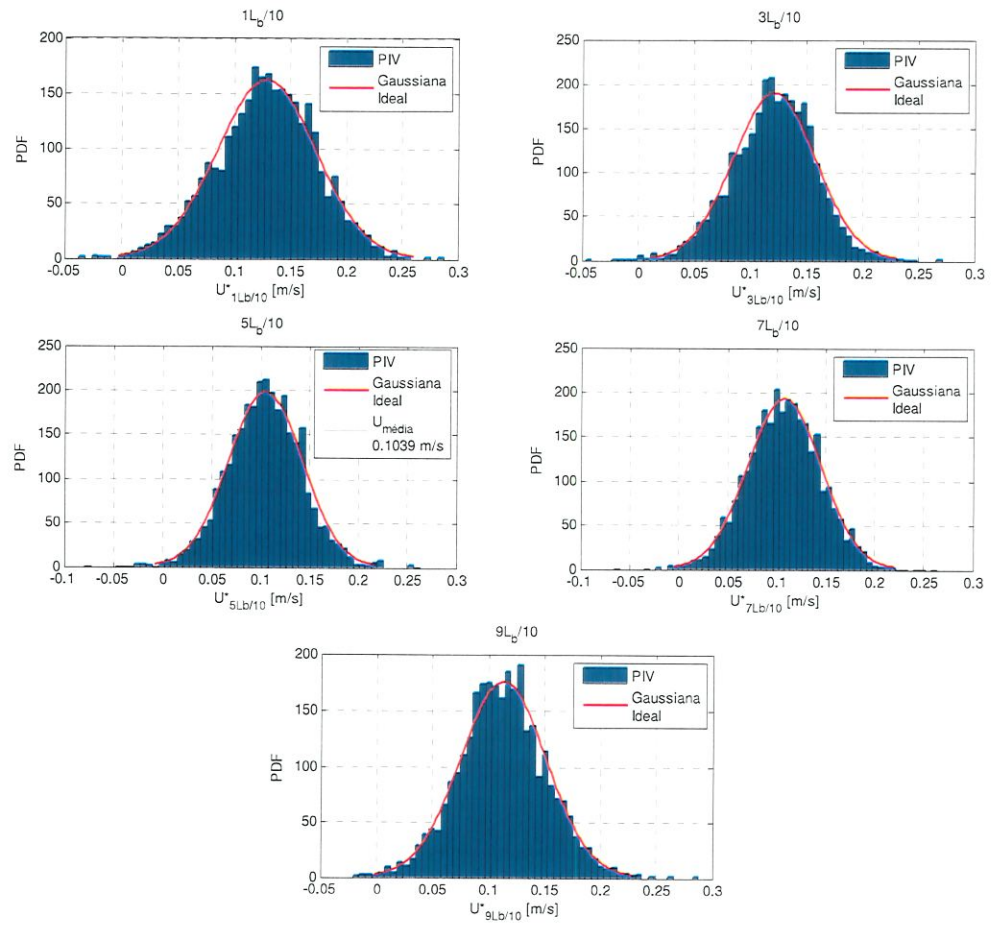


Figura B13. PDF de U_{mean} em várias posições L_b da bolha para $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,033$ m/s.

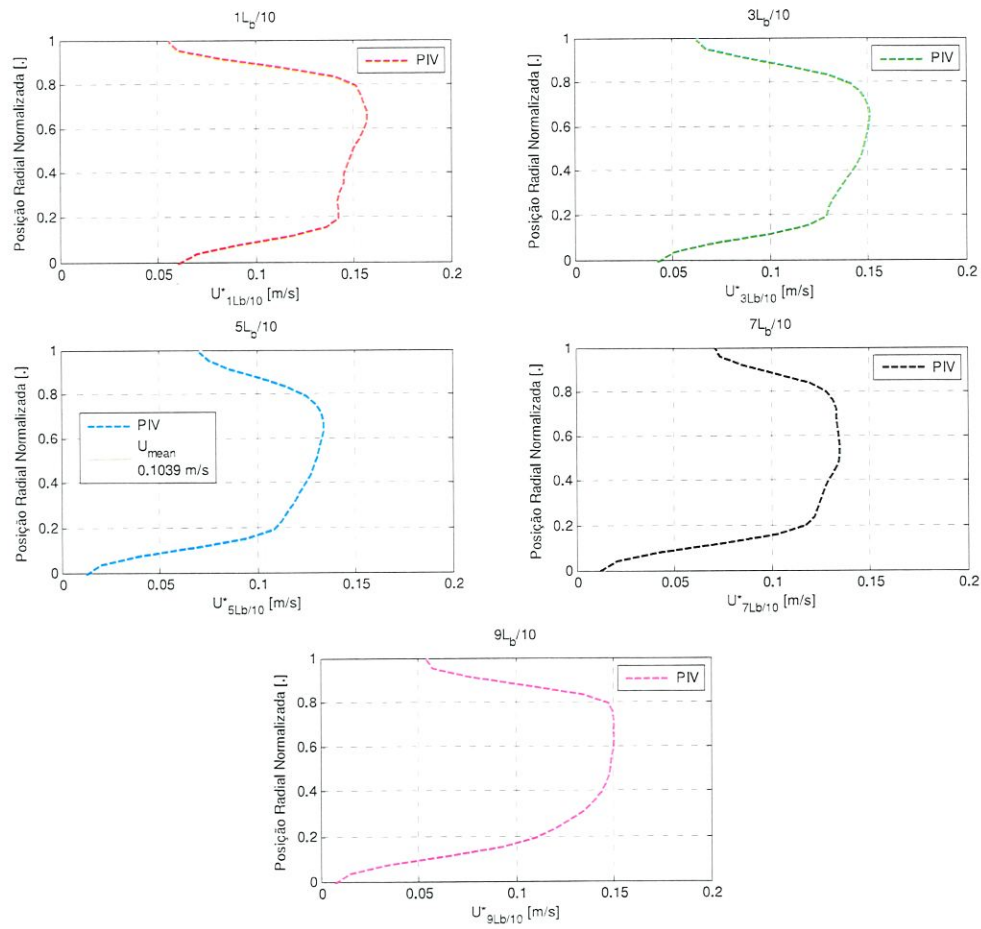


Figura B14. Perfil de velocidade média axial em diferentes posições L_b da bolha para $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,033$ m/s.

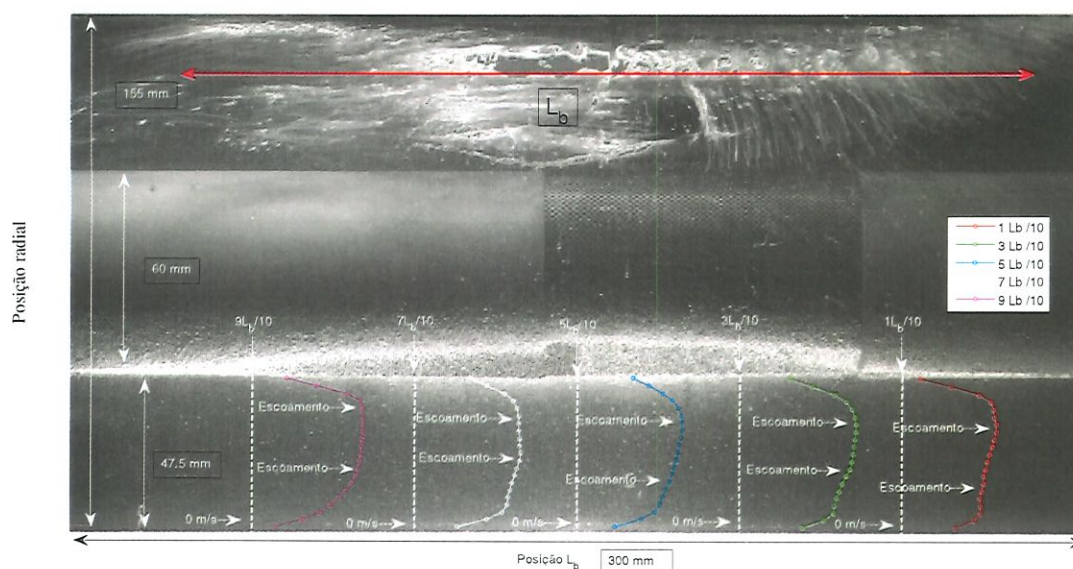


Figura B15. Bolha que atravessa a seção de visualização na parte superior e perfis de velocidade axial média no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular em diferentes posições em relação ao nariz de bolha para $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,033$ m/s.

A figura B16, da mesma forma que as demais, apresentam altas flutuações perto da parede, e quando a velocidade superficial de ar é aumentada de $j_a=0,033$ m/s para $j_a=0,037$ m/s, a tensão de Reynolds também aumenta, especialmente na posição $1L_b/10$ com um valor de $1,8$ Kg/ms², perto da parede inferior do tubo, .

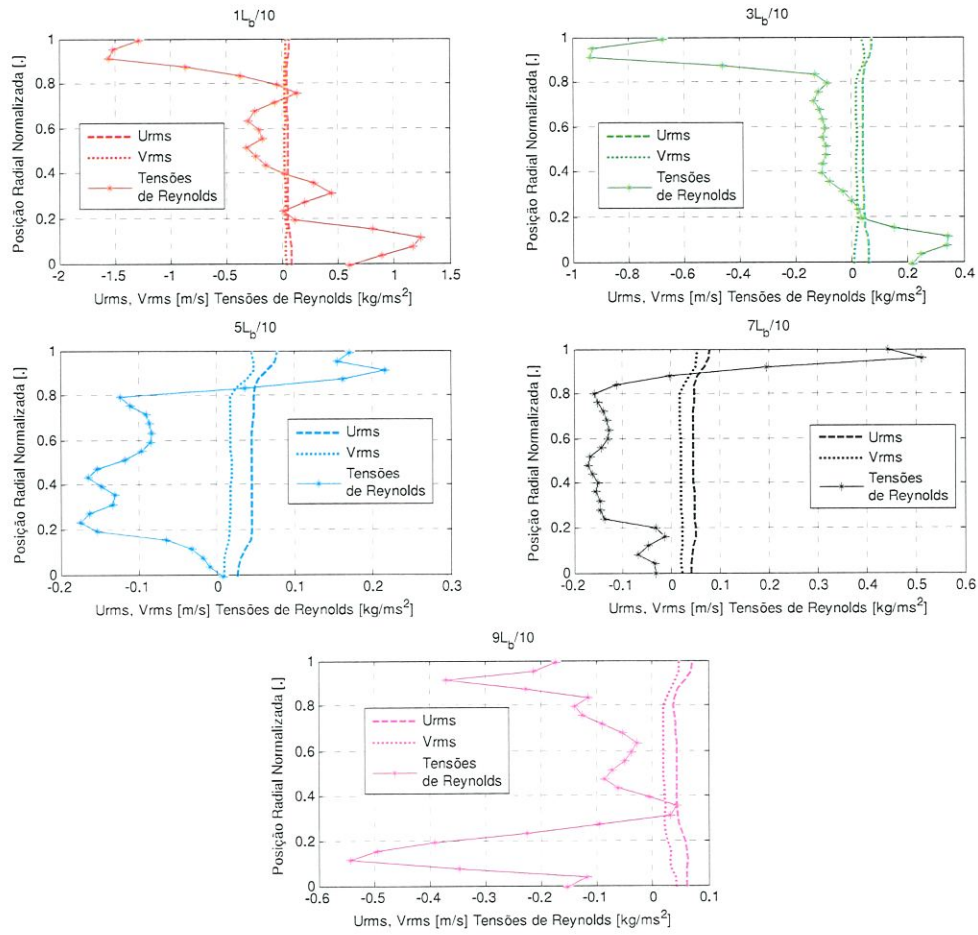


Figura B16. Estatísticas de turbulência, U_{rms} , V_{rms} e tensão de cisalhamento de Reynolds para $j_w=0,249$ m/s, $j_a=0,033$ m/s.

APÊNDICE C. PROCESSAMENTO E REDUÇÃO DE DADOS AWMS.

Nas figuras C1 a C4, o mesmo tipo de gráfico foi plotado para os escoamentos que se tinha dados do PIV, mostrando 4 modelos e novamente, o modelo de Bruggeman 1.

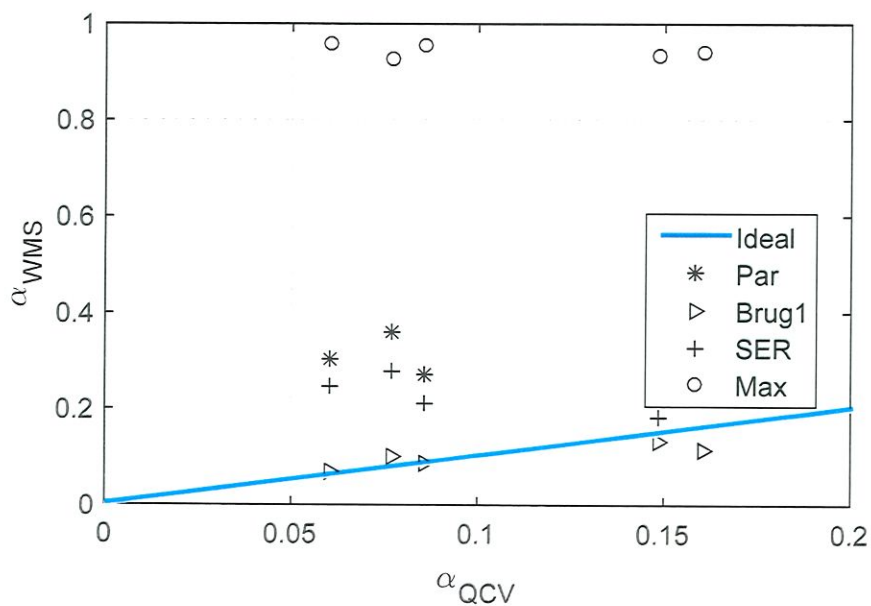


Figura C1. Fração de vazio para: $j_w = 0,154$ m/s e j_a de 0,039 m/s a 0,054 m/s.

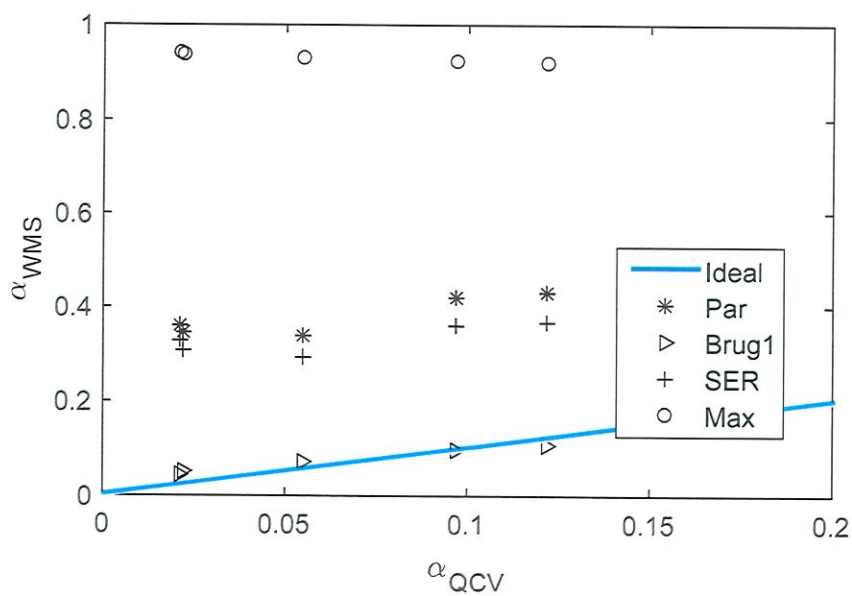


Figura C2. Fração de vazio para: $j_w = 0,187$ m/s e j_a de 0,036 m/s a 0,054 m/s.

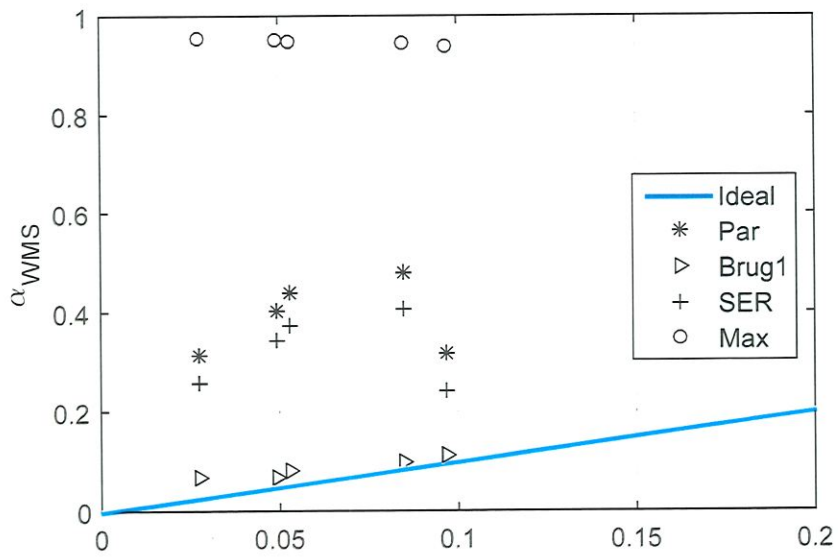


Figura C3. Fração de vazio para: $j_w = 0,249$ m/s e j_a de 0,033 m/s a 0,057 m/s.

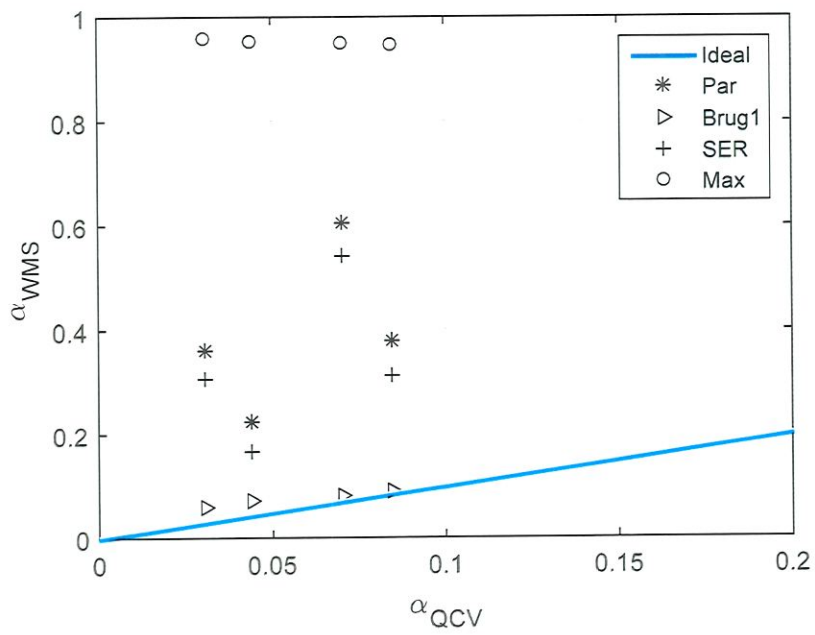


Figura C4. Fração de vazio para: $j_w = 0,291$ m/s e j_a de 0,031 m/s a 0,054 m/s

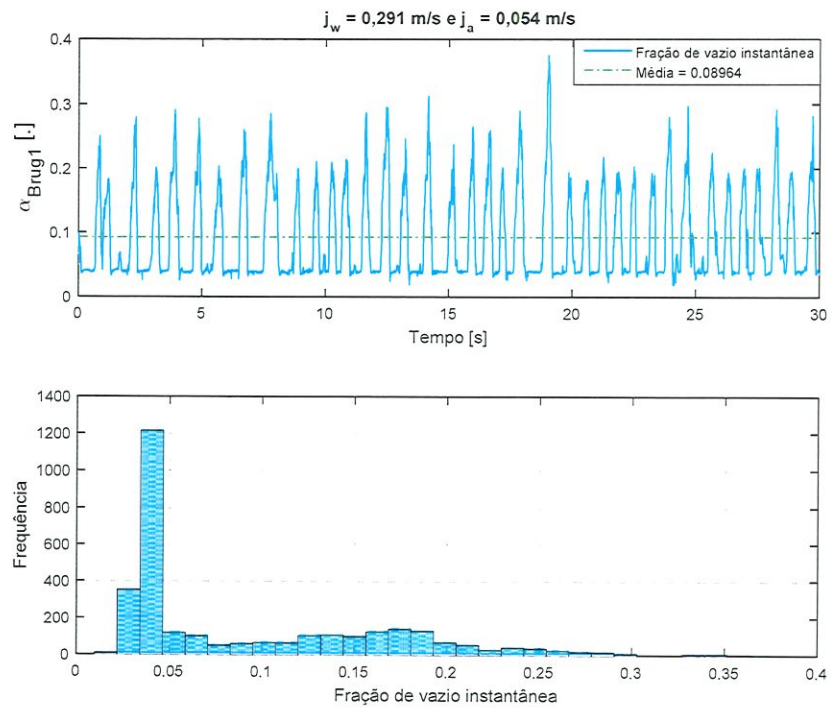


Figura C5. Função do tempo, com o histograma mostrando a distribuição de frações de vazio.

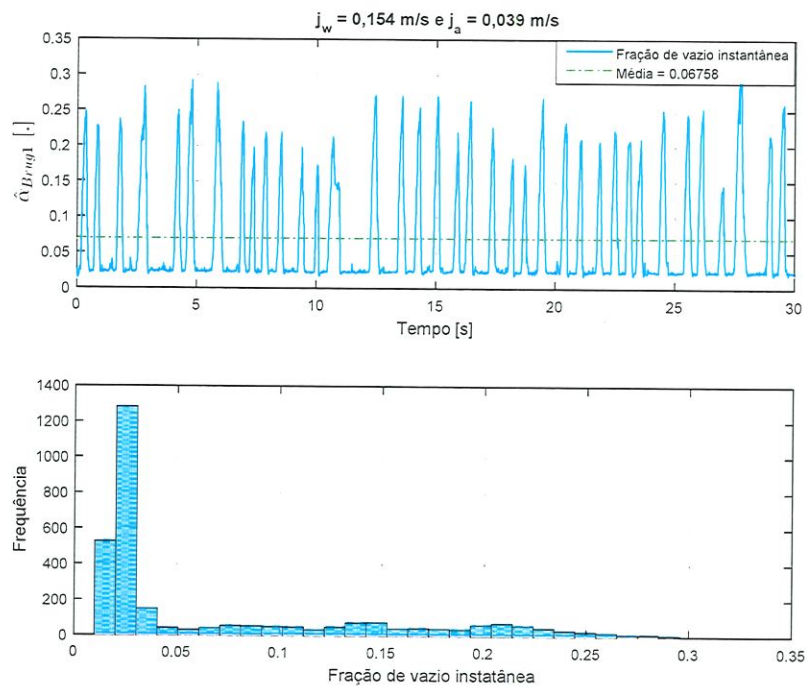


Figura C6. Fração de vazio e histograma para escoamento, a, $j_w=0,154 \text{ m/s}$, $j_a=0,039 \text{ m/s}$)

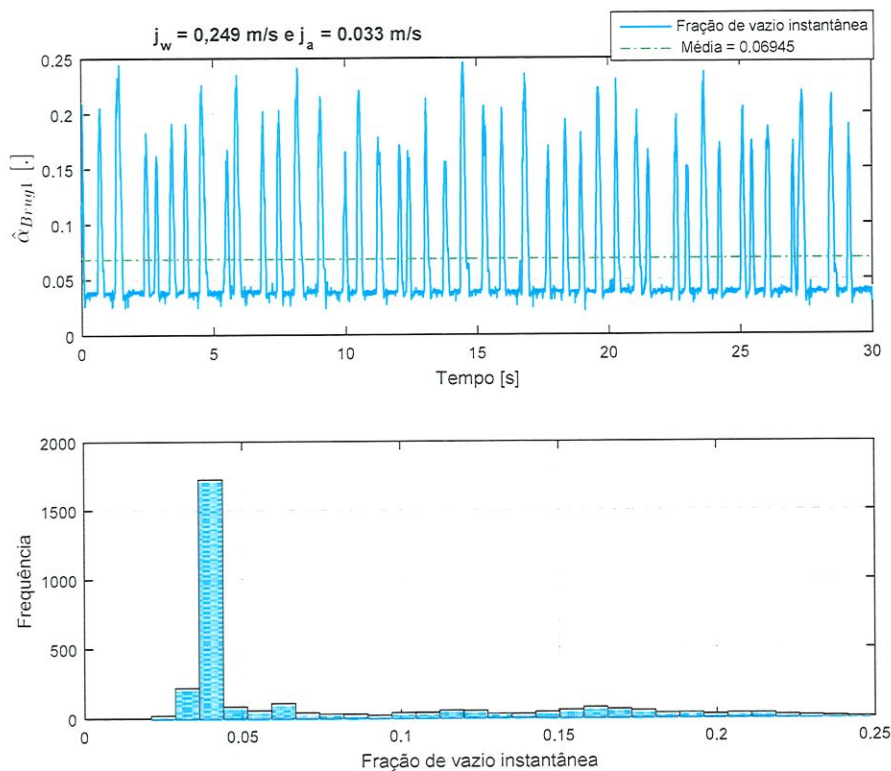


Figura C7. Fração de vazio e histograma para escoamento ‘e’, $j_w=0,249 \text{ m/s}$, $j_a=0,033 \text{ m/s}$.

APÊNDICE D. ESCOAMENTOS LAMINARES NOVA GEOMETRIA DUTO ANULAR $Re \sim 300$ E $Re 500$.

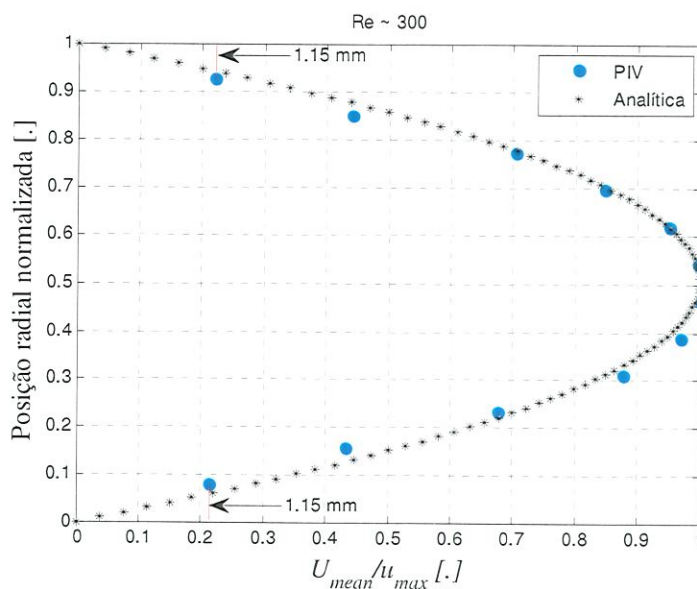


Figura D1. Velocidade axial média adimensional calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por meio do PIV e analiticamente para escoamento laminar no duto anular, com $Re=300$.

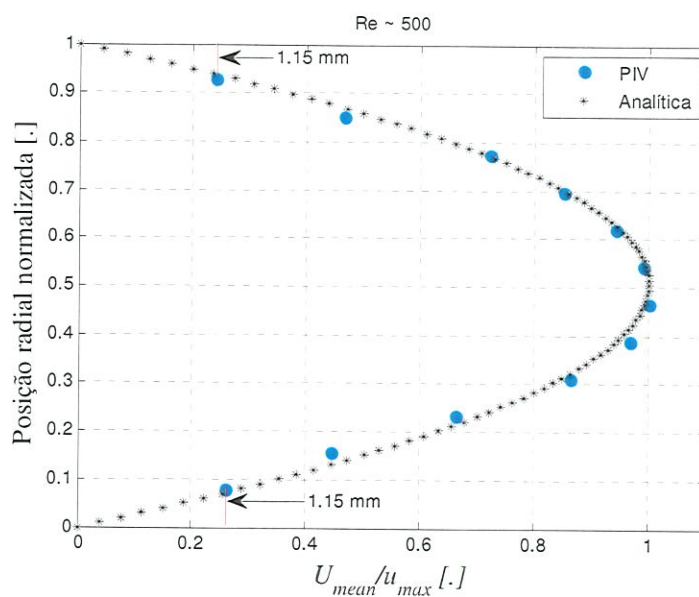


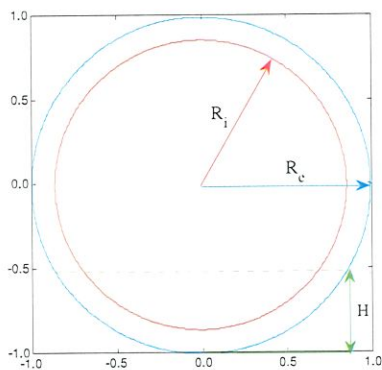
Figura D2. Velocidade axial média, adimensional calculada experimentalmente, no plano vertical diametral na parte inferior do duto anular por meio do PIV e analiticamente para escoamento laminar no duto anular, com $Re=500$.

APÊNDICE E. CÁLCULO DA FRAÇÃO DE VAZIO E NÚMERO DE REYNOLDS PARA ESCOAMENTO ESTRATIFICADO.

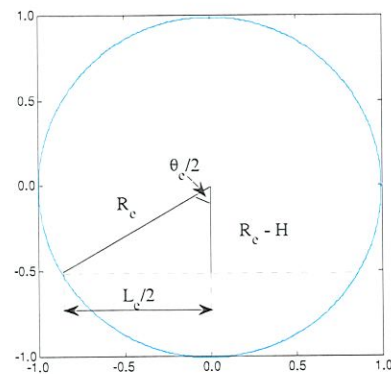
No caso em que o escoamento do líquido toca os dois tubos, tem-se a seguinte área, Figura F1 d, equação (E.1), Sendo: A , A_{circ} e A_{triang} , áreas do escoamento de água, circular e triangular, representadas na Figura F1, juntamente com os parâmetros do duto anular:

$$A = A_{circ} - A_{triang} \quad (E.1)$$

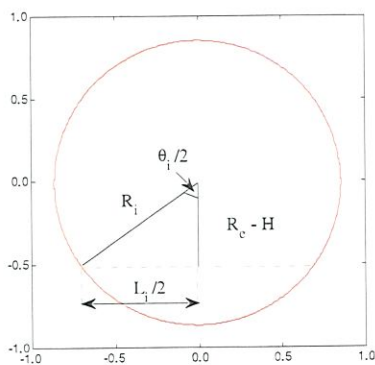
a



b



c



d

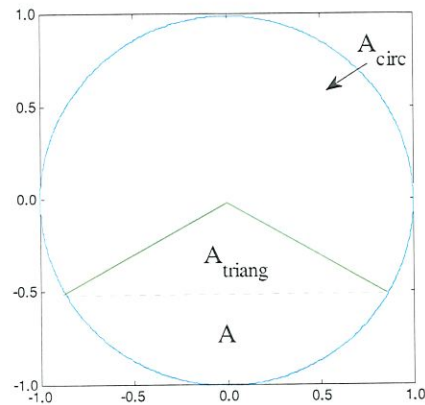


Figura E1. Tubo interno e tubo externo, diagramas.

Por se tratar de um duto anular, os cálculos devem ser divididos em tubo interno e tubo externo Figura E1 a.

Na Figura E1 d, é representado um tubo genérico, como se tratava de um duto anular, o cálculo foi feito para ambos os tubos, interno e externo, e então a seção em que a água escoava foi obtida pela subtração das seções de cada tubo.

Para o tubo interno, tem-se:

$$\theta_i = 2\cos^{-1} \frac{R_e - H}{R_i} \quad (\text{F.2})$$

Onde L_i pelo Teorema de Pitágoras é:

$$L_i = 2\sqrt{R_i^2 - (R_e - H)^2} \quad (\text{E.3})$$

A área de uma circunferência é dada pela equação:

$$A_{\text{circunferência}} = \pi R^2 \quad (\text{E.4})$$

No caso de uma fração de circunferência, representada por um ângulo θ_i ou θ_e nas Figura E1 b e c, a área é proporcional à razão entre o ângulo em questão e 2π :

$A_{\text{fração}} = \frac{\theta}{2\pi} A_{\text{circunferência}}$, tem-se então:

$$A_i = \frac{\theta_i}{2} R_i^2 - L_i \frac{R_e - H}{2} \quad (\text{E.5})$$

Para o tubo externo, seguindo os mesmos passos, chega-se em, equações (E.6) a (E.8):

$$\theta_e = 2\cos^{-1} \frac{R_e - H}{R_e} \quad (\text{E.6})$$

$$L_e = 2\sqrt{2HR_e - H^2} \quad (\text{E.7})$$

$$A_e = \frac{\theta_e}{2} R_e^2 - L_e \frac{R_e - H}{2} \quad (\text{E.8})$$

Três condições poderiam existir para o cálculo da área do escoamento, dependendo da altura do líquido, como segue, equações (E.9) a (E.11):

- Altura do líquido não toca a parede do tubo interno:

$$H < R_e - R_i$$

$$A_{\text{escoamento}} = A_e \quad (\text{E.9})$$

- Altura do líquido toca a parede do tubo interno, porém este não fica totalmente envolvido em água:

$$R_e - R_i \ll H \ll R_e + R_i$$

$$A_{\text{escoamento}} = A_e - A_i \quad (\text{E.10})$$

- Líquido envolve todo o tubo interno:

$$H > R_e + R_i$$

$$A_{escoamento} = A_e - \pi R_i^2 \quad (E.11)$$

Calcula-se o número de Reynolds como sendo, equação (E.12)

$$Re_{ds} = \frac{4\rho_w Q}{S\mu_w} \quad (E.12)$$

Em que: $v_w = \frac{Q}{A_{escoamento}}$ e $D_h = \frac{4A}{S}$ foram substituídos na equação (E.12), S é o perímetro molhado, ρ_w densidade da água, μ_w viscosidade da água e A é a área da seção transversal ocupada pela água.

O perímetro molhado depende das mesmas condições descritas para o cálculo da área do escoamento, pois ele varia caso a água toque ou não no tubo interno e caso ela envolva ou não este tubo por completo. Seguem as condições, equações (E.13) a (E.15):

- Altura do líquido não toca a parede do tubo interno:

$$H < R_e - R_i$$

$$S = \theta_e R_e \quad (E.13)$$

- Altura do líquido toca a parede do tubo interno, porém este não fica totalmente envolvido em água:

$$R_e - R_i \ll H \ll R_e + R_i$$

$$S = \theta_e R_e + \theta_i r_i \quad (E.14)$$

- Líquido envolve todo o tubo interno:

$$H > R_e + R_i$$

$$S = \theta_e R_e + 2\pi R_i \quad (E.15)$$

A fração de vazio na tubulação pode ser estimada a partir das áreas calculadas, equação (E.16):

$$\alpha = \frac{\pi(R_e^2 - R_i^2) - A_{escoamento}}{\pi(R_e^2 - R_i^2)} \quad (E.16)$$

APÊNDICE F. INCERTEZA EXPERIMENTAL.

F.1 Incertezas envolvidas na avaliação dos vetores velocidade do PIV

As fundamentais fontes de erros no cálculo dos vetores velocidade localizados na aplicação da técnica PIV (PALACIOS, 2011),

- Devido à correlação das imagens,
- Sistemático ou "bias"
- *Peak Locking*.
- Resolução espacial (número de vetores)
- Resolução temporal (frequência de aquisição).

Segundo a correlação das imagens, feita por Westerweel (2000), os erros produzidos podem ser suavizados quando número satisfatório de partículas permanece em uma janela de interrogação e os gradientes de velocidade não são altos, portanto como igualmente deve ser analisada a fração de partículas, F_o , que estão presentes em duas imagens da janela de interrogação. Com o número médio de partículas existentes em uma janela de interrogação, N_p , e a fração de partículas, F_o , que estão presentes em duas janelas de interrogação, segundo Van Doorne e Westerweel, (2007) são indicados valores de $N_p \geq 10$ e $F_o \geq 0,75$. Abordando os valores indicados, o erro devido à correlação normalmente é da ordem de 0,1 pixel.

Nos erros estatísticos (bias), o procedimento mais acertado para relacionar o tamanho do conjunto de dados com o erro de amostragem é analisar o "tempo de medição equivalente", que é determinado em função da "escala integral de tempo", a qual pode ser avaliada dividindo o diâmetro hidráulico do duto, D_h , pela velocidade média do escoamento, U_{mean} . O tempo de medição equivalente na técnica PIV, pode ser considerado dividindo-se o comprimento dos dados na direção axial do escoamento pela velocidade média do escoamento. O comprimento dos dados na direção axial é adquirido pela multiplicação do comprimento axial da região visualizada do escoamento e o número total de pares de imagens medidas Westerweel et al., (1996).

Os erros denominados *Peak Locking*, ocorrem significativamente porque o diâmetro médio da imagem da partícula, $d\tau$, é menor que 2 pixels Westerweel, (2000) e Christensen, (2004) e comumente são da ordem de 0,01 pixel Carr et al., (2009). Em semelhança ao diâmetro $d\tau$, Van Doorne e Westerweel, (2007) recomendam o uso de estimações incluídas entre $2 \text{ pixel} \leq d\tau \leq 4 \text{ pixel}$.

O erro de amostragem pode ser analisado adotando que a população observada tem um intervalo de certeza de 95%, portanto, usando considerações de estatística, o erro da média de uma amostra pode ser calculado como,

$$\pm 2\sigma_x / \sqrt{N_x} \quad (\text{F.1})$$

onde σ_x é o desvio padrão de uma variável medida X , e N_x é o número de amostras de X Carr et al., (2009). Concluindo que o erro de amostragem é inversamente proporcional a raiz quadrada do tempo de medição, devido ao número total de amostras estar ligado com o tempo de medição. Isto exhibe a importância de obter uma grande quantidade de campos vetoriais, principalmente na análise de escoamentos turbulentos Westerweel et al., (1996).

Os erros “bias” segundo a avaliação estatística dos vetores velocidades são considerados dependendo do escoamento em estudo, Carr et al., (2009). Para laminar onde os valores dos vetores velocidade conseguidos são independentes do tempo foram adquiridos 800 campos de velocidade, e no caso do escoamento turbulento, foram (3000 pares de imagens) ou-seja, 3000, campos de velocidade.

F.2 Incerteza experimental dos instrumentos

Incertezas experimentais são erros presentes nas medidas em relação ao valor real do que está sendo medido. Elas estão presentes devido à precisão dos equipamentos utilizados, ao princípio de funcionamento do equipamento, ao fenômeno observado e ao operador do equipamento. As incertezas das medidas são propagadas a outras medidas que dependam das medidas iniciais.

As incertezas experimentais foram avaliadas segundo o método exposto por Fox, McDonald, Pritchard. Com $R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ a incerteza experimental em R depende das incertezas em cada uma das variáveis X_i , elas são propagadas da seguinte maneira:

$$u_R = \pm \left[\left(\frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_1 \right)^2 + \left(\frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{F.2})$$

F.2.1 Incerteza dos medidores de água

Baixa vazão

$$u_{Q_w} = \pm \frac{0.75\%FE}{M_{Q_w}} = \pm \left(\frac{26.25}{M_{Q_w}} \right) \% \quad (\text{F.3})$$

Alta vazão

$$u_{Q_w} = \pm \frac{1\%M_{Q_w}}{M_{Q_w}} \pm 1\% \quad (\text{F.4})$$

F.2.2 Incertezas nas velocidades superficiais

Para as incertezas nas velocidades superficiais de água, são desprezadas as incertezas nas medições dos diâmetros, levando-se em consideração somente a incerteza dos medidores de vazão. Sendo assim, as incertezas são as mesmas:

$$u_{j_w} = \pm \left(\frac{26.25}{M_{Q_w}} \right) \% \quad (\text{F.5})$$

$$u_{j_w} = \pm 1\%$$

F.2.3 Incerteza da vazão mássica de gás.

Os medidores de medição da vazão de ar a montante e a jusante da seção de testes conseguem a medição da vazão volumétrica do ar, para que se tenha a vazão mássica de ar, se precisa multiplicar o valor ministrado pelo medidor pela densidade do ar logo em seguida o medidor. As Equações (F.6) e (F.7) explicam esta relação.

$$\dot{m}_{G,mt} = \rho_{G,m} Q_{G,mt} \quad (\text{F.6})$$

$$\dot{m}_{G,j} = \rho_{G,j} Q_{G,j} \quad (\text{F.7})$$

Para os dois casos, a propagação da incerteza está conexas com a vazão volumétrica e com a densidade do gás.

$$\dot{m}_{G,mt} = \pm \sqrt{\left(\frac{\rho_{G,mt} \delta \dot{m}_{G,mt}}{\dot{m}_{G,mt} \delta \rho_{G,mt}} u_{\rho_{G,mt}}\right)^2 + \left(\frac{Q_{G,mt} \delta \dot{m}_{G,mt}}{\dot{m}_{G,mt} Q_{G,mt}} u_{Q_{G,mt}}\right)^2} \quad (\text{F.8})$$

$$\dot{m}_{G,j} = \pm \sqrt{\left(\frac{\rho_{G,j} \delta \dot{m}_{G,j}}{\dot{m}_{G,j} \delta \rho_{G,j}} u_{\rho_{G,j}}\right)^2 + \left(\frac{Q_{G,j} \delta \dot{m}_{G,j}}{\dot{m}_{G,j} Q_{G,j}} u_{Q_{G,j}}\right)^2} \quad (\text{F.9})$$

Derivando parcialmente as Equações (F.8) e (F.9) e substituindo na Equação (F.6) e (F.7), procede que as incertezas da vazão mássica de ar a montante e a jusante da seção de testes são função das densidades e das vazões volumétricas a montante e a jusante, respectivamente. Avaliando a incerteza da massa específica da Equação (F.12), as incertezas das vazões mássicas de ar podem ser abreviadas pelas Equações (F.10) e (F.11).

$$u_{\dot{m}_{G,mt}} = \pm \sqrt{u_{\rho_{G,mt}}^2 + u_{Q_{G,mt}}^2} \quad (\text{F.10})$$

$$u_{\dot{m}_{G,j}} = \pm \sqrt{u_{\rho_{G,j}}^2 + u_{Q_{G,j}}^2} \quad (\text{F.11})$$

F.2.4 Massa específica do gás.

A incerteza de medição da densidade do ar pode ser calculada pela Equação (F.13). Neste evento a incerteza conexas a massa molar foi desprezada Delmée (2003).

$$\frac{\delta \eta}{\delta \dot{m}_{G,j}} = \frac{1}{\dot{m}_{G,mt}} \quad (\text{F.12})$$

$$\mu_{\rho} = \pm [(u_P)^2 + (u_T)^2 + (u_Z)^2] \quad (\text{F.13})$$

Segundo mencionado pelo fabricante do transmissor de pressão a incerteza da pressão P é de $\pm 0,5 \%$ do fundo de escala, a da temperatura, adquirida com o termopar do tipo K, é de $\pm 0,75 \%$, do fator de compressibilidade é de $\pm 0,5\%$ e da pressão atmosférica de $0,1 \%$ da leitura.