

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Rafael da Costa Rocha**

**Validação de bancada experimental para  
investigação metrológica de escoamento  
bifásico em tubulação horizontal**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Pedro Paulo Almeida Silva  
Coorientador: Iris Trindade Chacon

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2016

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao meu orientador Pedro Paulo Almeida Silva, a minha coorientadora Iris Trindade Chacon e a equipe Dinam, Eving Silva e Herbert Benvindo, que abriram as portas do laboratório para mim para elaboração desse projeto, e também pela atenção e paciência em fazer esse projeto dar certo.

Gostaria de agradecer a toda minha família em especial meus pais, Alexandre e Elizabeth, minha irmã, Marianna, que durante todos esses anos de luta compreenderam todo esse sofrimento e me deram todo o suporte psicológico e financeiro para que tudo isso fosse possível.

Também gostaria de agradecer a minha namorada Gabriela por todo suporte e carinho nos últimos anos, principalmente nesses últimos meses que foram muito difíceis para mim.

Por último gostaria de agradecer especialmente as duas pessoas, que infelizmente durante realização desse trabalho nos deixaram para virarem nossos anjos, que são a minha avó Dalva Cardoso da Costa e minha tia avó Margarida Ferreira da Costa. Com certeza absoluta elas estão muito felizes e orgulhosas por esse trabalho e por essa conquista. Muito obrigado por tudo, sempre vou amar muito vocês!

## RESUMO

### **Validação de bancada experimental para investigação metrológica de escoamento bifásico (ar – água) em tubulação horizontal**

O presente trabalho de conclusão de curso tem como objetivo abordar a montagem e realizar a validação de uma bancada experimental para investigação metrológica de um escoamento bifásico, ar - água, em uma tubulação horizontal.

A realização desse trabalho é de extrema importância, pois será possível comprovar e identificar os possíveis padrões de escoamento para diferentes vazões, para que assim, possa ser reproduzido futuramente na indústria do Petróleo e Gás.

O trabalho foi realizado no Laboratório de Caracterização da Dinâmica de Escoamento de Fluidos da Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos do Inmetro (Dinam/Inmetro), que conta com a infraestrutura para realização do experimento. Como a identificação dos padrões reproduzidos em experimento são difíceis de serem notados com exatidão a olho nu, foi necessário utilizar uma técnica óptica de visualização conhecida como *Shadow Sizer*, seu funcionamento será explicado posteriormente.

Palavras chaves: Escoamento bifásico. Dutos horizontais. Padrão de escoamentos. Shadow Sizer. Metrologia em dinâmica de fluidos.

## **ABSTRACT**

### **Bench experimental validation for metrological research of two-phase flow (air- water) in horizontal pipe**

The present work of course completion aims to approach the assembly and to carry out the validation of an experimental bench for metrological investigation of a biphasic flow, air - water, in a horizontal pipe.

The realization of this work is extremely important, since it will be possible to prove and identify the possible flow patterns for different flow rates, so that it can be reproduced in the future in the Oil and Gas industry.

The work was carried out in the Laboratory of Characterization of Fluid Flow Dynamics of the Division of Metrology in Fluid Dynamics of Inmetro (Lacad / Dinam / Inmetro), which has the infrastructure to perform the experiment. Since the identification of the patterns reproduced in the experiment are difficult to accurately notice with the naked eye, it was necessary to use an optical visualization technique known as Shadow Sizer, its operation will be explained later.

Key-words: Biphasic flow. Horizontal ducts. Flow patterns. Shadow sizer. Metrology in fluid dynamics.

## Sumário

RESUMO	3
ABSTRACT	4
1.1. Introdução	7
1.1.1. Motivação	7
1.1.2. Fundamentos do escoamento multifásico	8
1.1.3. Propriedades	9
1.1.4. Escoamento bifásico	10
1.2. Padrões de escoamento: gás – líquido	11
1.3. Técnicas de medições mais conhecidas	14
1.3.1. PIV - Particle Image Velocimetry [3][4]	14
1.3.2. VLD - Velocimetria por Laser Doppler [3] [5]	15
1.4. Aparato experimental	17
1.4.1. Tubulação	17
1.4.2. Reservatório de água e filtro de areia	18
1.4.3. Bomba hidráulica, inversor de frequência e medidor de vazão	19
1.4.4. Sistema de ar comprimido	20
1.4.5. Técnica de visualização empregada – <i>shadow sizer</i>	23
1.5. Procedimento experimental	25
1.6. Resultados e discussões	27
1.7. Conclusão e trabalhos futuros	31
1.7.1. Mapa de escoamento	32
1.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	35
Anexo A – Registro de medição	36
Anexo B – Relação entre Controle entre Inversor e medidor de vazão	37

## Lista de figuras

Figura 1 – <i>bubble flow</i> .....	11
Figura 2 – <i>plug flow</i> .....	12
Figura 3 – <i>stratified flow</i> .....	12
Figura 4 – <i>wavy flow</i> .....	12
Figura 5 – <i>slug flow</i> .....	13
Figura 6 – <i>annular flow</i> .....	13
Figura 7 - Sistema de velocimetria por luz pulsada (Raffel, 1998). ....	15
Figura 8 - Esquema de Funcionamento de um Sistema VLD. [6].....	16
Figura 9 - Bancada experimental .....	17
Figura 10 – Reservatório de água e filtro de areia .....	18
Figura 11 – Modelo CFW 10 – WEG .....	19
Figura 12 – Modelo IFC 100C - Krohne.....	19
Figura 13 – Válvula que libera saída do ar comprimido .....	21
Figura 14 – Conjunto medidor de vazão e manômetro.....	21
Figura 15 – Conjunto de medidores de vazão .....	22
Figura 16 – Conjunto de válvulas distribuidoras .....	22
Figura 17 - Câmera - NanoSense Mk III Plus câmera 2kHz, Gigabit .....	23
Figura 18 - LED Backlight illumination.....	24
Figura 19 – <i>bubble flow</i> .....	27
Figura 20 - <i>bubble flow</i> .....	27
Figura 21 - <i>plug flow</i> .....	28
Figura 22 - <i>plug flow</i> .....	28
Figura 23 – <i>slug flow</i> .....	29
Figura 24 - <i>slug flow</i> .....	29
Figura 25- <i>stratified flow</i> .....	30
Figura 26– Mapa de arranjos de Taitel e Dukler (1976) .....	32
Figura 27- Mapa de arranjos de Waiman et al. (1979) .....	33
Figura 28- Mapeamento do experimento.....	33

## **1.1.Introdução**

### **1.1.1.Motivação**

O escoamento multifásico é um fenômeno complexo, no qual é extremamente difícil de prever, compreender e modelar o seu sistema. Isto muitas vezes se deve a fenômenos, como por exemplo, deslizamento entre fases, mudança de padrão de escoamento e transferência de massa entre fases.

O seu estudo é de extrema importância, dado a sua vasta aplicação industrial em diversos ramos, como por exemplo, bebidas, alimentício, petroquímico, dentre outros, sendo o mercado do Petróleo e Gás um dos maiores interessados nesse estudo. Isto se deve por ser uma fonte riquíssima de energia não renovável, que possui um alto valor envolvido em todo processo e encontra-se há alguns anos em crise. De acordo com a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP), o preço do barril de petróleo está numa queda contínua há anos. No mês de janeiro de 2016 a queda foi tão acentuada que atingiu o seu valor mais baixo de US\$25.00/barril.

Desta forma, as empresas mais do que nunca se sentem obrigadas a estudarem a natureza do escoamento e o seu comportamento em diferentes situações, para poderem quantificar todos os processos envolvidos, e assim, auxiliar na escolha da melhor estratégia para realizar tanto a sua exploração quanto à produção, visando dessa maneira potencializar o seu lucro.

Dado o momento atual em que o País se encontra, onde se pode nitidamente notar a dependência dessa exploração, surgiu o interesse da Divisão de Metrologia em Dinâmica de Fluidos (Dinam) em dar continuidade a um artigo técnico científico [10] e nos estudos sobre assunto, o que pode ser muito útil futuramente para a indústria petroquímica.

### 1.1.2.Fundamentos do escoamento multifásico

Como definição geral o escoamento multifásico é uma passagem simultânea em um sistema de fluxo composto de duas ou mais fases. Nesse trabalho, fez se opção por utilizar as duas mais comuns: ar e água.

O escoamento multifásico é muito comum na natureza, pode-se visualiza-lo em diversas situações, tais como:

- Na circulação sanguínea no corpo humano;
- As bolhas subindo num copo de refrigerante;
- Em uma mangueira irrigando um jardim.

As fases presentes num escoamento multifásico são compostas por:

- Sólidos - Normalmente são pequenas partículas incompressíveis e não deformáveis nos fluidos que a cercam;
- Líquidos - São relativamente incompressíveis, mas com interfaces deformáveis;
- Gases - São compressíveis e deformáveis.

Os tipos de escoamento multifásicos mais comuns são os bifásicos, como por exemplo:

- gás – sólido - onde as partículas sólidas ficam suspensas no gás. Esse caso tem importância industrial, como por exemplo, em transporte pneumático, na combustão de combustíveis pulverizados, entre outros;
- líquido – líquido - onde podemos destacar alguns casos, como por exemplo, o já citado escoamento do petróleo que encontramos água e óleo;
- líquido – sólido - onde podemos destacar casos de purificação de água, aonde o líquido chega repleto de partículas que são filtradas posteriormente;
- gás – líquido - provavelmente a forma mais importante de escoamento multifásico, que pode ser encontrado amplamente encontrado no mercado industrial, conforme falado, e será estudado neste projeto.



### 1.1.3. Propriedades

A forma das interfaces e o comportamento do escoamento são conhecidos como padrão ou regime de escoamento, respectivamente. Devido a algumas excitações, forças ou até mesmo mecanismos no interior do fluido é possível reproduzir diversas fases ao mesmo tempo. Mas para reproduzirmos o padrão de fluxo é necessário que haja um equilíbrio dos fatores externos.

De acordo com Whalley (1996), o regime de escoamento depende dos seguintes fatores externos:

- vazões de líquido e de gás;
- propriedades dos fluidos (massa específica, viscosidade e tensão superficial);
- condições de operação (pressão, temperatura, gravidade, etc);
- características geométricas do duto: forma, diâmetro e inclinação.

A transição entre os regimes de escoamento diferentes e a determinação dos regimes é um processo complicado de se realizar por ser observação visual direta. Desta forma, gerando incerteza no experimento, dado uma grande arbitrariedade do observador e a sua interpretação. Sendo assim, para auxiliar nesse trabalho foi utilizada uma técnica óptica chamada *Shadow Sizer*, que permitiu visualizar todos os padrões de escoamento com precisão e uma tubulação feita de acrílico, que permitia a visualização do fluido ao longo da bancada.

#### 1.1.4. Escoamento bifásico

Para que o estudo do escoamento bifásico fosse iniciado foi necessário definir alguns parâmetros básicos, os quais estão inseridos no equacionamento final. Considerando um líquido, água a temperatura ambiente, isto é, aproximadamente 25°C, e um gás, ar comprimido com a temperatura aproximadamente a 22°C, no interior de uma tubulação com Ø 50 mm com uma determinada área total de seção transversal do duto(  $A_{TR}$ ). Com base nesses fatores indicados, tem-se que as velocidades superficiais da água e do ar ( $V_{sÁgua}$  e  $V_{sAr}$ ), são calculadas utilizando a razão das vazões volumétricas  $Q_{Água}$   $Q_{Ar}$  e da área de seção transversal  $A_{TR}$ .

Sendo assim, tem-se:

$$V_{sÁgua} = \frac{Q_{Água}}{A_{TR}}$$

$$V_{sAr} = \frac{Q_{Ar}}{A_{TR}}$$

Essas velocidades superficiais são utilizadas em diversas aplicações nesse estudo, como por exemplo, nas variáveis nas coordenadas dos eixos dos mapas de escoamento, nas modelagens dos sistemas, entre outras.

Outro parâmetro que é importante para esse estudo é a velocidade média dos fluidos, que é definida pela razão entre a vazão volumétrica da água e do ar e da sua respectiva a área da fração da seção transversal do duto. Estas velocidades representam verdadeiramente o deslocamento de cada um dos fluidos.

Sendo assim, temos:

$$V_{Água} = \frac{Q_{Água}}{A_{Água}}$$

$$V_{Ar} = \frac{Q_{Ar}}{A_{Ar}}$$

Quando em um escoamento, neste caso bifásico, os dois fluidos possuem diferentes densidades ou viscosidades ocorre um fenômeno que será visualizado em detalhe posteriormente, que é um deslizamento de um dos fluidos sobre o outro. Isto ocorre, pois devido essa diferença entre elas uma delas tende a escoar com uma velocidade acima da outra, gerando assim esse fenômeno.

## 1.2. Padrões de escoamento: gás – líquido

No escoamento bifásico, quando o ar e água fluem simultaneamente na tubulação diversos tipos de fluxo podem ocorrer. Os regimes mais comuns são os seguintes:

### **Bolha (*bubble flow*):**

A fase líquida é contínua e uma dispersão de bolhas flui dentro do contínuo líquido. As bolhas são sujeitas a um movimento complexo dentro do fluxo e são geralmente de tamanho não uniforme, conforme demonstrado na figura 1. Devido ao efeito de forças de flutuação sobre as bolhas, elas tendem a acumular-se na parte superior do tubo.

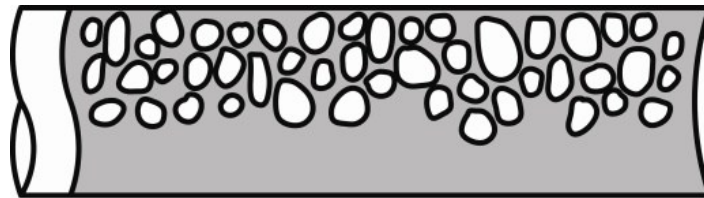


Figura 1 – *bubble flow*

### **Tampão (*plug flow*):**

Com o aumento da vazão de ar na tubulação as bolhas que estavam presentes anteriormente, vão se agrupando formando bolhas alongadas em forma de balas, formando assim, um novo padrão de escoamento o qual é conhecido por muitos autores como *plug flow*, conforme observado na figura 2. Este regime é intermitente, isto é, caracteriza-se pelo aparecimento de bolhas alongadas e de porções de líquido, que por muitas vezes contém algumas pequenas bolhas arrastadas.

Assim como no *bubble flow*, devido aos efeitos da flutuação mantém-se o tempo todo na parte superior da tubulação.

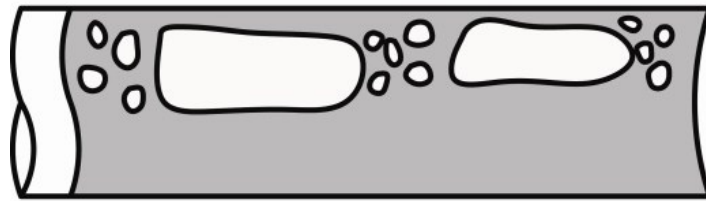


Figura 2 – *plug flow*

**Estratificado (*stratified flow*):**

Este regime ocorre quando a separação gravitacional é completa com escoamento contínuo de cada fase. O líquido flui ao longo da parte inferior do tubo e o gás ao longo da parte superior do tubo. A figura 3 a seguir ilustra este regime.

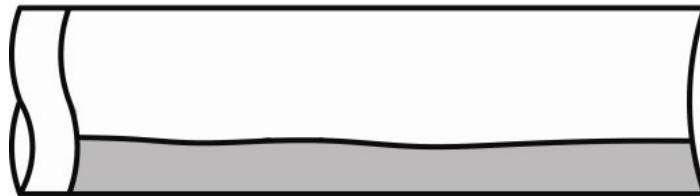


Figura 3 – *stratified flow*

**Estratificado Ondulado (*wavy flow*):**

À medida que a velocidade do gás é aumentada no fluxo estratificada, as ondas são formadas na interface gás-líquido dando o ondulado ou regime de fluxo estratificados-ondulado. A figura 4 a seguir detalha este regime.

Este padrão de escoamento em específico foi reproduzido apenas próximo ao local onde ocorria a injeção de ar na tubulação, sendo assim, não será reproduzido nesse trabalho, pois era uma região desconsiderada.



Figura 4 – *wavy flow*

### **Golfadas (*slug flow*):**

Este padrão é caracterizado pela passagem ao longo do canal de espumosas “golfadas”, que enchem praticamente toda a secção transversal do tubo. Essas “golfadas”, que são intercaladas com regiões de ondulado ou fluxo anular, muitas vezes podem ser muito grandes e é um dos maiores causadores de mau funcionamento de oleodutos horizontais, tornando assim cada vez mais importante o seu estudo.

Assim como no *plug flow*, figura 4, este regime também é intermitente, ou seja, aparecem alternadamente golfadas e porções de líquido na tubulação, que podem carregar, conforme consta na figura 5 a seguir, pequenas bolhas arrastadas.

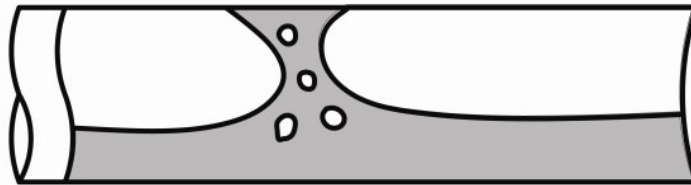


Figura 5 – *slug flow*

### **Anular (*annular flow*):**

Neste tipo de padrão, apresentado na figura 6, o líquido flui ao longo da parede do tubo como um filme, sendo a parede inferior mais espessa devido à força da gravidade, e os fluxos do gás se mantêm no centro da tubulação com uma velocidade bastante elevada. Normalmente, algumas pequenas gotículas são arrastadas no núcleo, assim como algumas bolhas de gás na película de água na parede. Isto se deve às elevadas vazões que são aplicadas para reproduzir este tipo de padrão, o que devido às limitações dos equipamentos não foi possível reproduzir em experimento.

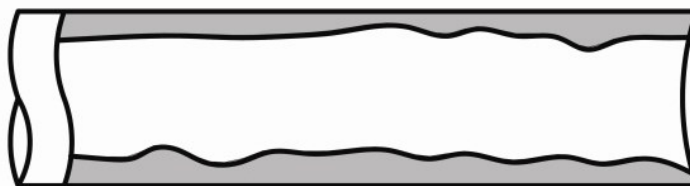


Figura 6 – *annular flow*

### **1.3.Técnicas de medições mais conhecidas**

Atualmente existem muitas técnicas sofisticadas que utilizam diferentes princípios de medição e que auxiliam na identificação e descrição dos padrões de escoamento, pois elas permitem determinar inúmeras variáveis de interesse. Neste trabalho foi utilizado o *shadow sizer*, mas entre as demais pode-se citar, Particle Image Velocimetry (PIV), Velocimetria por Laser Doppler (VLD).

#### **1.3.1.PIV - Particle Image Velocimetry [3][4]**

PIV ou VIP, Velocimetria de Imagem de Partículas, é uma técnica óptica de medição não intrusiva que é bastante útil para pesquisa e diagnóstico em processos de fluxo, turbulência, micro fluídica, atomização por pulverização e combustão.

Os seus principais elementos são:

- fluido- deve ser transparente ao comprimento de onda da luz empregada;
- partículas traçadoras- são responsáveis pelo espalhamento da luz, devendo gerar imagens de qualidade e fiéis ao escoamento;
- sistema de iluminação- utiliza um emissor de luz (Laser Nd:YAG.), que neste caso é o veículo de transporte de informação;
- sistema de aquisição das imagens- possui uma grande variedade de sensores eletrônicos de imagem;
- sistema de processamento das imagens- extração do campo de velocidade desejado.

Esta técnica é uma das mais utilizadas nas pesquisas. Na literatura é possível encontrar uma vasta variedade de implementações, principalmente em algoritmos para análise das imagens e extração do campo de velocidade, mas em geral o seu funcionamento é bem simples. Na figura 7 pode-se observar a técnica supracitada.

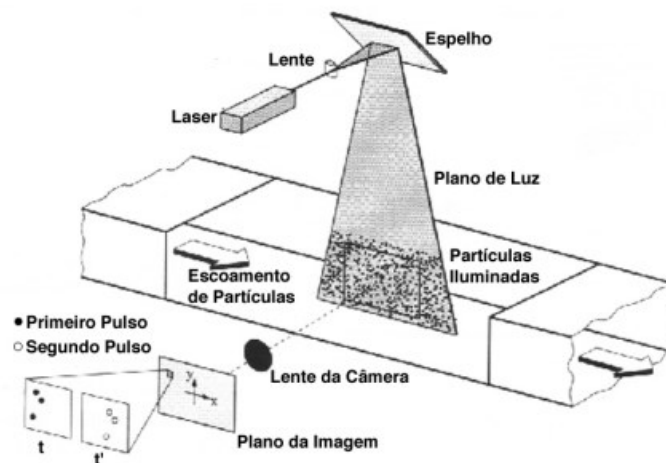


Figura 7 - Sistema de velocimetria por luz pulsada (Raffel, 1998).

### 1.3.2.VLD - Velocimetria por Laser Doppler [3] [5]

Esta técnica óptica experimental é aplicada para campos mais complexos. Ela está baseada no efeito Doppler, que ocorre quando o receptor, ou emissor, de uma onda eletromagnética está em movimento, resultando em uma variação na frequência e no comprimento de onda com relação à onda emitida originalmente, e tem como objetivo medir a velocidade de um fluido de forma precisa e não invasiva. A figura 8 a seguir detalha o seu esquema de funcionamento.

Ela é formada de três sistemas distintos:

- sistema de geração de luz coerente- sua finalidade produzir um feixe de laser concentrado e ter potência compatível com a devida aplicação;
- sistema óptico- sua finalidade de dividir o feixe luminoso que vem da fonte de laser, em dois ou mais feixes, de igual intensidade. Além disso, deve conduzi-los até um ponto definido do escoamento e captar o efeito DOPPLER gerado no ponto de cruzamento;
- sistema de aquisição e processamento do sinal- possui quatro diferentes métodos: Contador de Franjas, Seguidor de Frequência, Analisador de Correlação e Analisador de Espectro de Frequência.

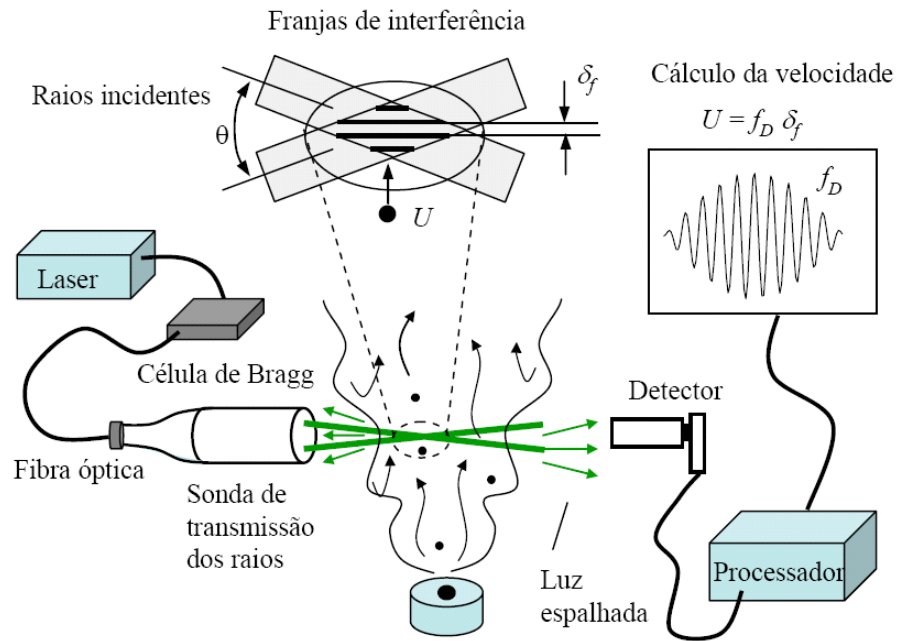


Figura 8 - Esquema de Funcionamento de um Sistema VLD. [6].

Destacam-se as seguintes características dessa técnica:

- medição não intrusiva- não perturba o escoamento;
- não requer calibração- a resposta é linear à velocidade do fluido, independentemente das variações das condições do ambiente, já que o método é baseado na estabilidade das ondas eletromagnéticas;
- fornece a direção e o sentido das três componentes de velocidade;
- alta resolução espacial e temporal.



## 1.4.Aparato experimental

Os experimentos foram realizados em uma bancada que possui os seguintes itens:

- tubulação em acrílico e PVC;
- reservatório de água de 500L;
- filtro de areia (até 36 l/min);
- bomba hidráulica centrífuga – Dancor Série PF – 17;
- bicos injetores de ar comprimido;
- inversor de frequência – CFW 10 – WEG;
- medidor de vazão de ar – GFM 37 – Aalborg;
- medidor de vazão de líquidos eletromagnético - IFC 100C – KROHNE;
- *shadow sizer*;
- lâmpada de LED;
- manômetros.

Abaixo ireis descrever os principais componentes:

### 1.4.1.Tubulação

A tubulação em questão possui  $\varnothing_{\text{nominal}}$  de 50 mm e possui dois tipos de material. Na região onde foram reproduzidos e analisados os padrões de escoamento, o material utilizado foi o acrílico, para justamente facilitar a visualização. Nos demais trechos foi utilizado o PVC, também com o mesmo diâmetro nominal. Além disso, ela está em circuito fechado e possui seção de testes circular. Na figura 9 abaixo pode-se observar a tubulação.

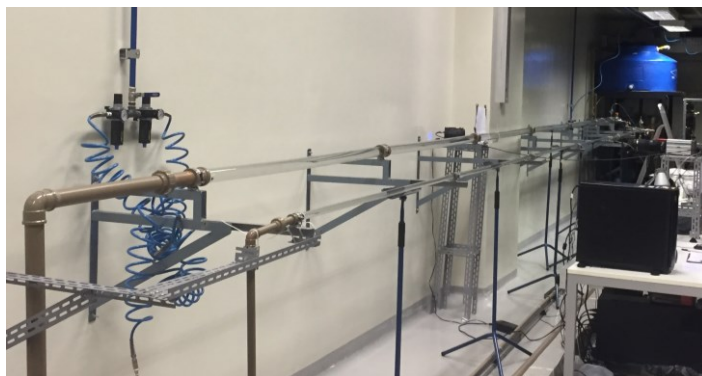


Figura 9 - Bancada experimental

#### 1.4.2. Reservatório de água e filtro de areia

O reservatório de água, ou caixa d'água, de 500 l ( figura 10) abastece toda a bancada e está conectado a um filtro de areia - Dancor DFr-11- por meio de *by-pass*. Esse sistema de filtragem é de suma importância para o experimento, tendo em vista que regularmente é necessário fazer a limpeza de toda a água, para que as impurezas não interfiram na captura das imagens.

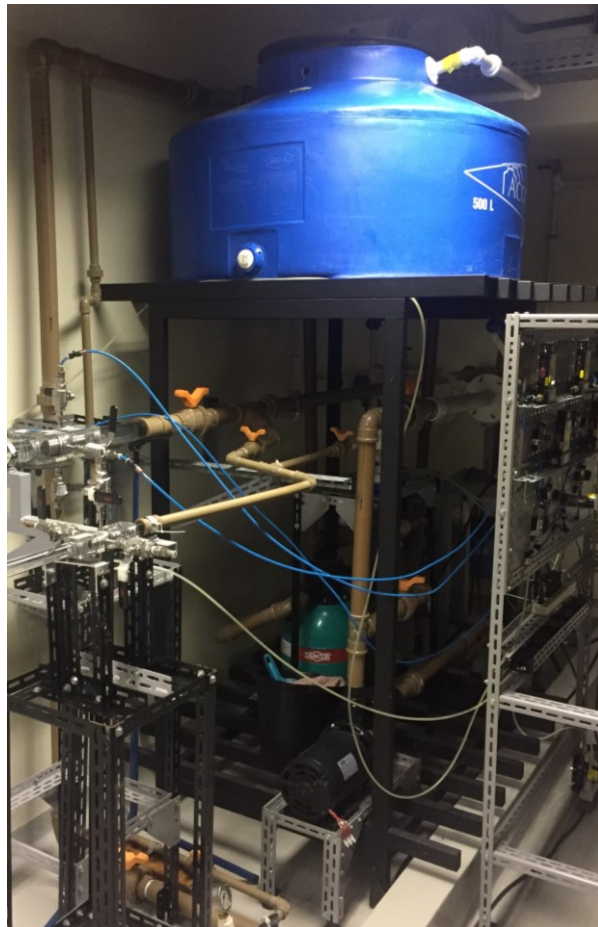


Figura 10 – Reservatório de água e filtro de areia

### 1.4.3. Bomba hidráulica, inversor de frequência e medidor de vazão

Para viabilizar o experimento foi necessário instalar uma bomba hidráulica (série PF-17 da Dancor) que trabalha em conjunto com o inversor de frequência (CFW 10), conforme figura 11. Este inversor possui controle V/F (escalar), que é recomendado para aplicações mais simples como o acionamento da maioria das bombas e ventiladores, para que assim seja possível reduzir perdas no motor e no inversor gerando uma economia de energia.

Para auxiliar no monitoramento da vazão selecionada, foi utilizado um medidor de vazão eletromagnético IFC 100C, conforme figura 12, que é indicado para medição contínua do fluxo de volume de corrente, velocidade de fluxo, condutividade, fluxo de massa a densidade constante e temperatura de bobina do sensor de medição.



Figura 11 – Modelo CFW 10 – WEG



Figura 12 – Modelo IFC 100C - Krohne

#### 1.4.4.Sistema de ar comprimido

A seguir, são apresentados os principais componentes que integram o sistema:

- compressor de ar comprimido (limite de até 850 l/min e pressão de 9 a 12 bar);
- filtro de ar com regulador de pressão;
- medidores de vazão de ar, calibrados, do tipo termo mássico (15,00 L/min e 40,00 L/min);
- manômetros calibrados (4,0 kgf/cm<sup>2</sup>);
- válvula distribuidora com o Ø<sub>central</sub> de 50 mm, composta por quatro válvulas esfera de 1/4"

Para iniciar o processo a válvula que libera a entrada de ar comprimido no sistema, conforme figura 13, é aberta e o ar chega às válvulas distribuidoras que encontram-se diametralmente opostas, conforme figura 16. As quatro válvulas por sua vez encontram-se acopladas à tubulação de testes para controlar a injeção de ar na tubulação de acrílico.

Para cada uma das quatro vias possui um medidor de vazão de gás GFM 37, conforme figura 14, da marca Aalborg e um manômetro para controlar o seu funcionamento.

Este tipo de medidor de vazão é um tipo termo mássico restrito para gases. O seu funcionamento é através do fluxo de calor que é inserido no gás, que com auxílio de sensores é gerado posteriormente um sinal de saída, que é uma função da quantidade de calor transportada pelos gases para indicar taxas de fluxo baseadas na massa molecular.

Esses medidores de vazão ( figuras 13, 14, 15 e 16) são extremamente importantes para o experimento e precisam estar calibrados, tendo em vista que eles controlam a vazão em L/min de ar que são injetados na tubulação e qualquer diferença no valor pode gerar diferenças nos resultados obtidos.



Figura 13 – Válvula que libera saída do ar comprimido

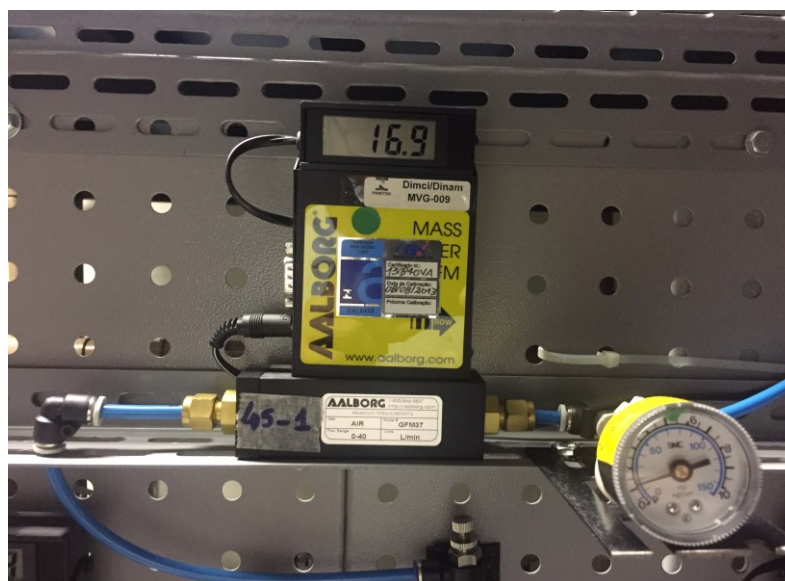


Figura 14 – Conjunto medidor de vazão e manômetro





Figura 15 – Conjunto de medidores de vazão

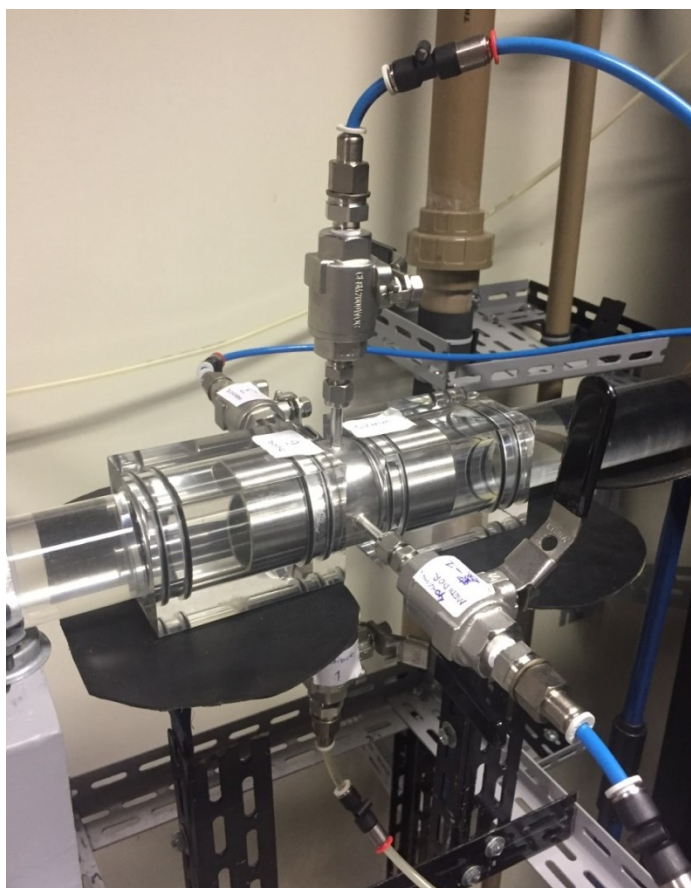


Figura 16 – Conjunto de válvulas distribuidoras

#### 1.4.5. Técnica de visualização empregada – *shadow sizer*

O funcionamento desta técnica é bem simples. Inicialmente é necessário uma análise minuciosa de toda a bancada buscando um ponto onde os padrões são melhores definidos. Além disso, é necessário levar em consideração na escolha um local onde não sofra influência de perda de carga, como ocorre na faixa de 9m até 10m, por exemplo. Este assunto poderia ser levado em consideração, mas como a montagem da bancada foi feita de forma que as junções não causassem perdas, é possível escolher o ponto que fica 6,4m de distância da origem.

Feito isso, é possível posicionar a estrutura que sustenta o conjunto, câmera e lente de frente para tubulação. No lado oposto encontra-se a tubulação de acrílico com uma régua na parte inferior, para auxiliar no dimensionamento das bolhas, um anteparo com uma folha branca formato A4 e a fonte de luz difusora – LED (figura 18).

No escoamento bifásico utilizado, ar – água, as gotículas de ar ou até mesmo as bolhas alongadas são iluminadas pela fonte de luz e as sombras projetadas pelas partículas são captadas pela câmera, figura 17, com auxílio do programa *DynamicStudio*. A partir das imagens obtidas é possível obtermos o diâmetro, área, perímetro e velocidade das bolhas podem ser identificados.

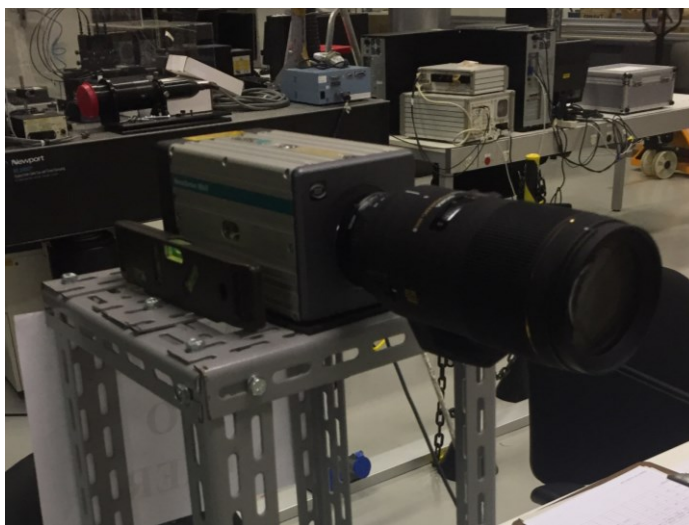


Figura 17 - Câmera - NanoSense Mk III Plus câmera 2kHz, Gigabit



Figura 18 - LED Backlight illumination



## **1.5.Procedimento experimental**

A seguir serão apresentadas as principais etapas executadas ao longo do experimento.

Na montagem da bancada diversos pontos tiveram que ter um cuidado redobrado para obter um resultado satisfatório. Inicialmente como a bancada é extremamente longa, foi necessário montar junções entre as tubulações. Esse momento foi extremamente crítico, pois qualquer desnível entre elas poderia gerar uma perda de carga, e assim, influenciar no escoamento. Sendo assim, foi realizado um nivelamento e alinhamento do plano vertical e horizontal da tubulação e testes de estanqueidade para o circuito hidráulico e o circuito de ar comprimido.

Além disso, foram verificados os limites de vazão do líquido sem a injeção de ar comprimido, visando observar o comportamento do escoamento e identificar possíveis vibrações e vazamentos.

Posteriormente foi feito um registro dos limites de vazão de líquido de acordo com a frequência de rotação do controle da bomba hidráulica sem a injeção de ar, com a válvula que atua no ajuste da vazão totalmente aberta utilizando o medidor de vazão como referência, com o propósito de facilitar o ajuste da vazão na operação da bancada.

Visando a confirmar a calibração dos medidores de vazão foram realizadas as seguintes etapas:

- análise da variação das vazões de líquido ajustadas na faixa de 2,0 L/min até 20 l/min comparando-a com a tabela de resultados da calibração como descritos no certificado de calibração do medidor de vazão de líquidos;
- verificação dos limites de vazão de ar comprimido levando em consideração a pressão de entrada, antes da distribuição para os quatro medidores térmicos mássicos e a pressão de saída de cada medidor onde é injetado o ar na seção de testes sem a presença de líquido pela válvula distribuidora;
- análise da variação das vazões de ar comprimido ajustadas na faixa 3,0 L/min até 15 l/min comparando-a com a tabela de resultados da calibração, conforme descrito nos certificados de calibração dos medidores térmicos mássicos;

Feito isso restava definir quais seriam as faixas de operação do ar e da água.

Para definir a vazão da água foi necessário analisar o manual da bomba, que foi verificado qual era a sua faixa de operação, sendo assim definido que seria de 100L/min até 200 l/min. Por outro lado, a vazão do ar foi definida de maneira arbitrária e foi de 60 l/min. Sendo no caso utilizado três medidores GFM 37, que variam até 15 l/min e um medidor até 45 l/min.

Por fim, restava definir quanto que as vazões iriam variar de ponto em ponto. Como o tempo para realizar o experimento foi relativamente pequeno foi definido que seria o ponto de 10 l/min, isto é, fixaria a vazão do líquido por exemplo em 100 l/min e iria “varrer” de 10L/min em 10 l/min a vazão do ar até atingir o máximo estabelecido de 60 l/min. Sendo assim definido que seriam 66 combinações de vazões a serem observadas e registradas em um Registro de Medição Geral, conforme ANEXO A.

## 1.6.Resultados e discussões

As figuras 19 e 20 apresentam o comportamento do escoamento tipo *bubble* encontrado com as combinações de vazão  $Q_L$  120 L/min x  $Q_{AR}$  5 l/min e  $Q_L$  200 l/min x  $Q_{AR}$  5 l/min, respectivamente.

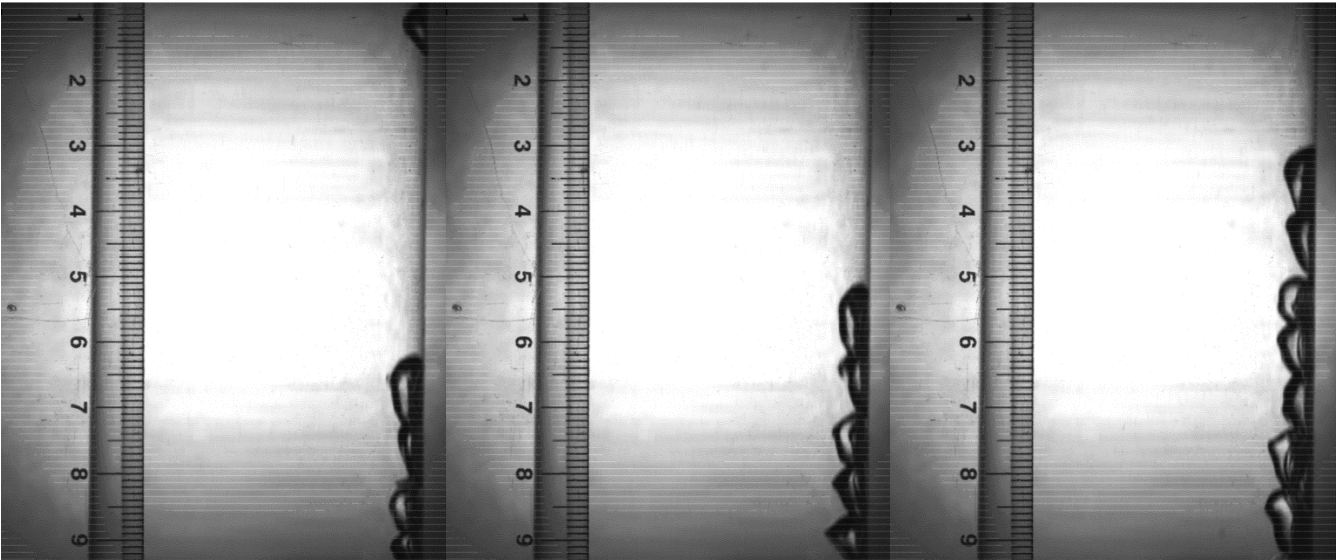


Figura 19 – *bubble flow*

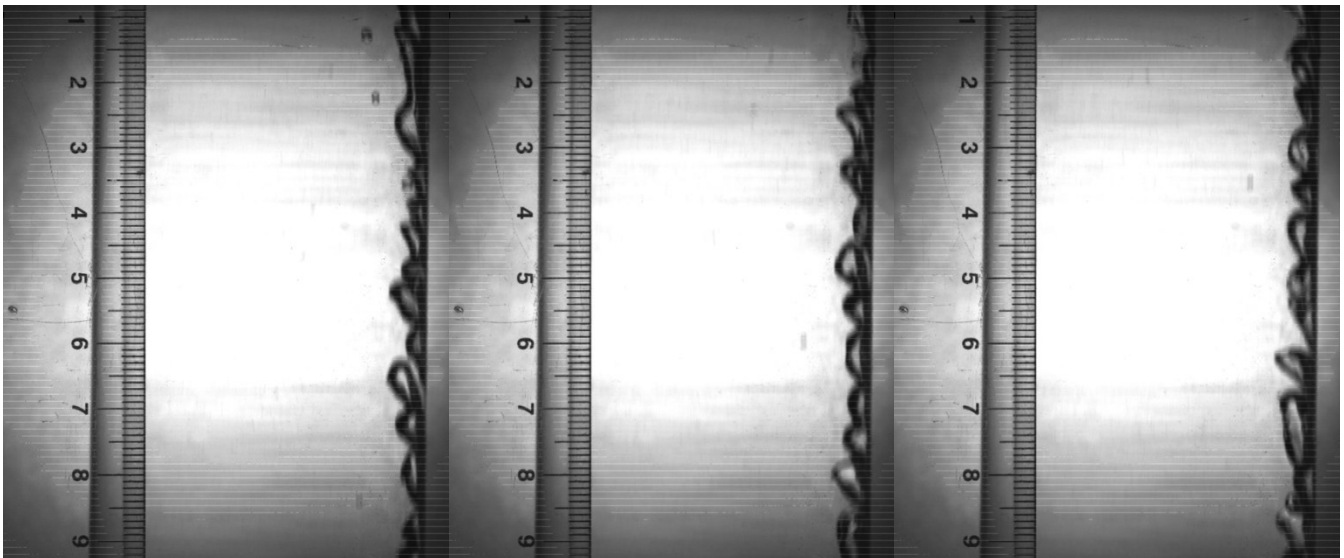


Figura 20 - *bubble flow*

No caso a seguir, as figuras 21 e 22 apresentam o comportamento do escoamento tipo *plug* encontrado com as combinações de vazão  $Q_L$  150 L/min x  $Q_{AR}$  20 l/min e  $Q_L$  200 l/min x  $Q_{AR}$  20 l/min, respectivamente.

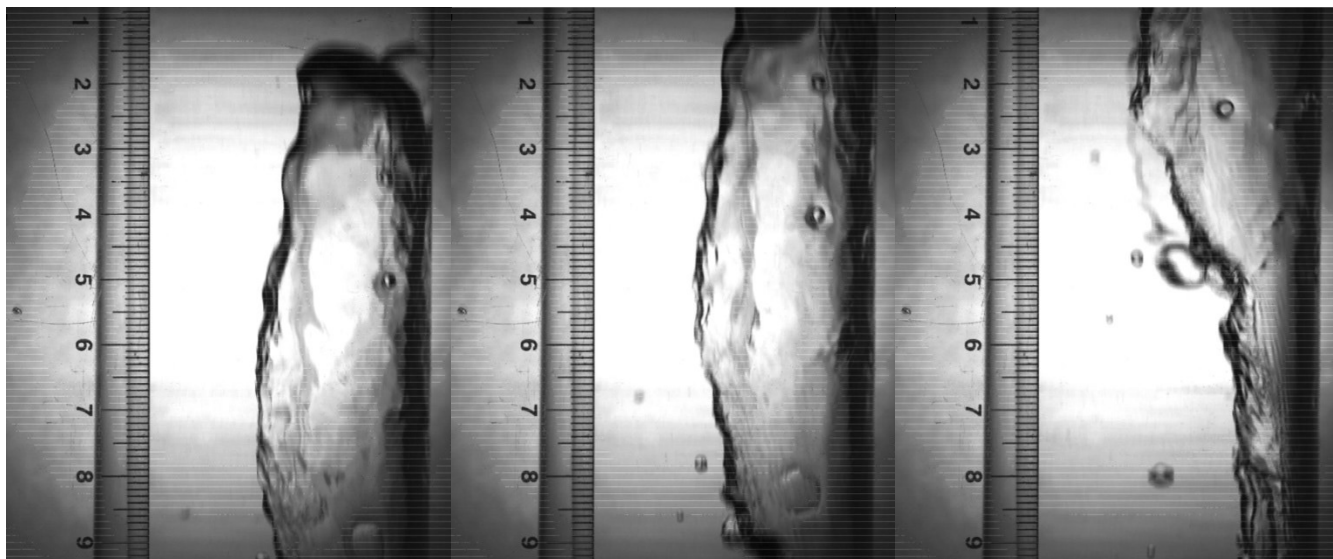


Figura 21 - *plug flow*

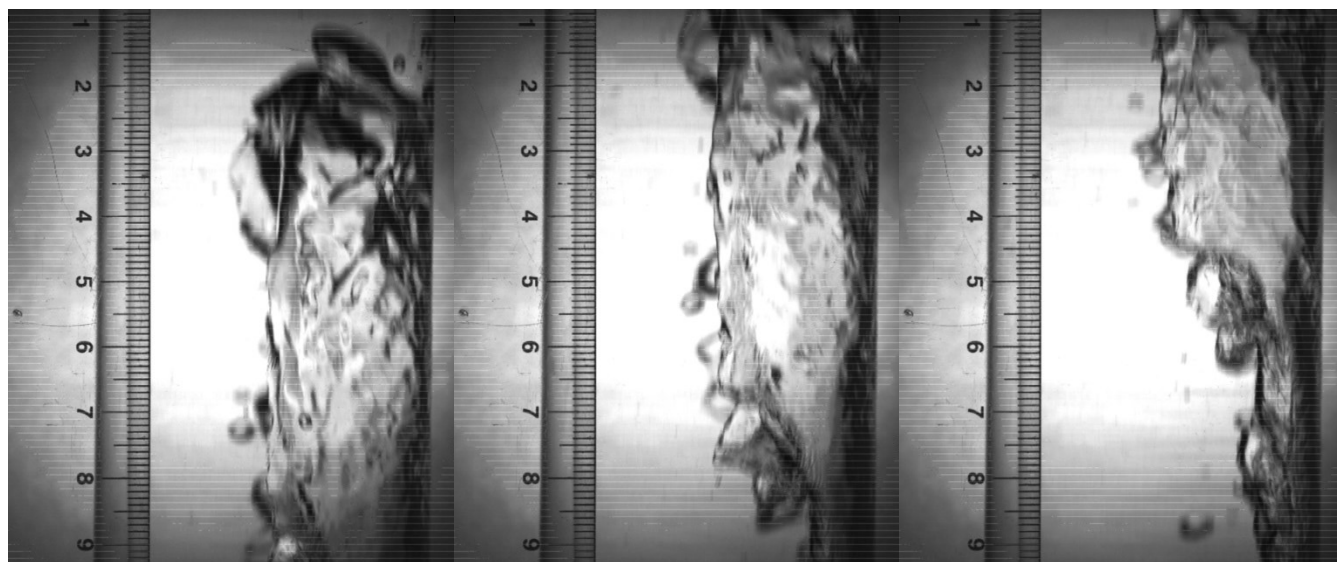


Figura 22 - *plug flow*

No caso a seguir, as figuras 23 e 24 apresentam o comportamento do escoamento tipo *slug* encontrado com as combinações de vazão  $Q_L$  110 L/min x  $Q_{AR}$  60 l/min e  $Q_L$  200 l/min x  $Q_{AR}$  60 l/min, respectivamente.

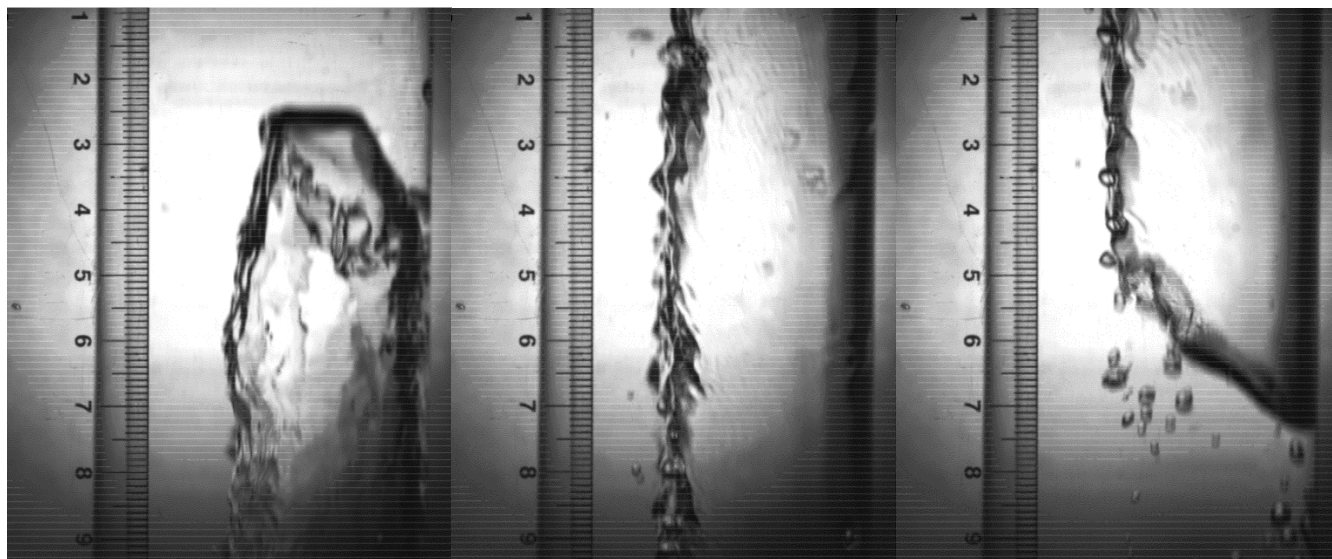


Figura 23 –*slug flow*

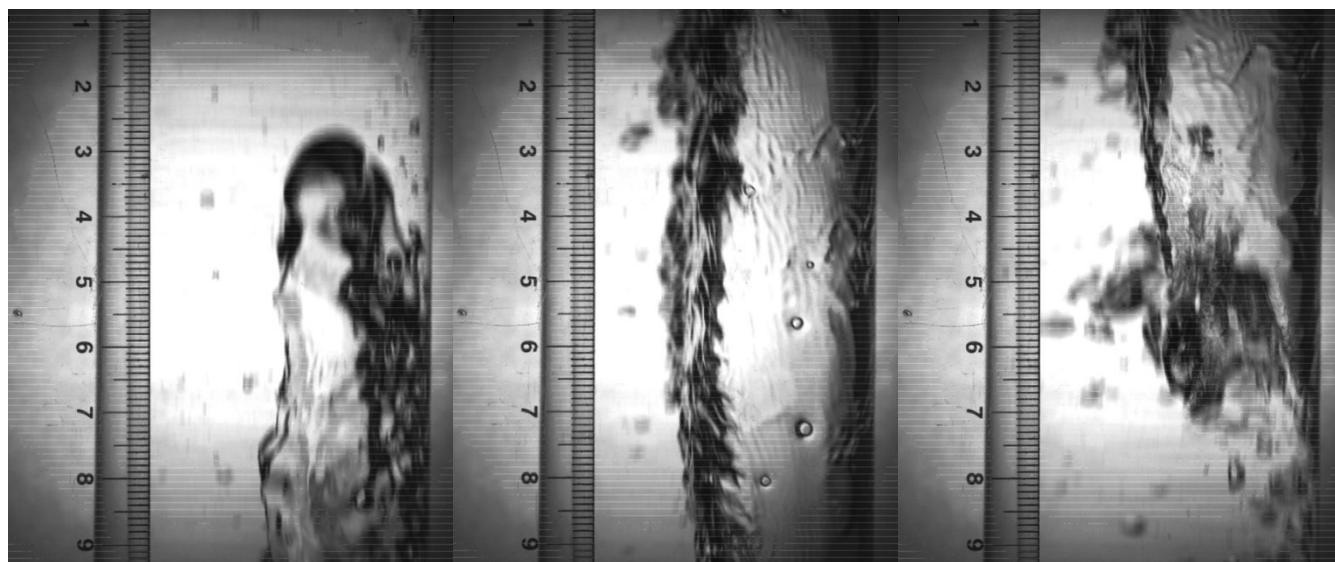


Figura 24 - *slug flow*

No caso a seguir, a figura 25 apresenta apenas ilustrativamente o comportamento de escoamento tipo *stratified*, pois devido às limitações da bancada e nas condições operacionais utilizadas neste trabalho, não seria possível reproduzir este tipo de padrão de escoamento no ponto em que as imagens foram captadas.

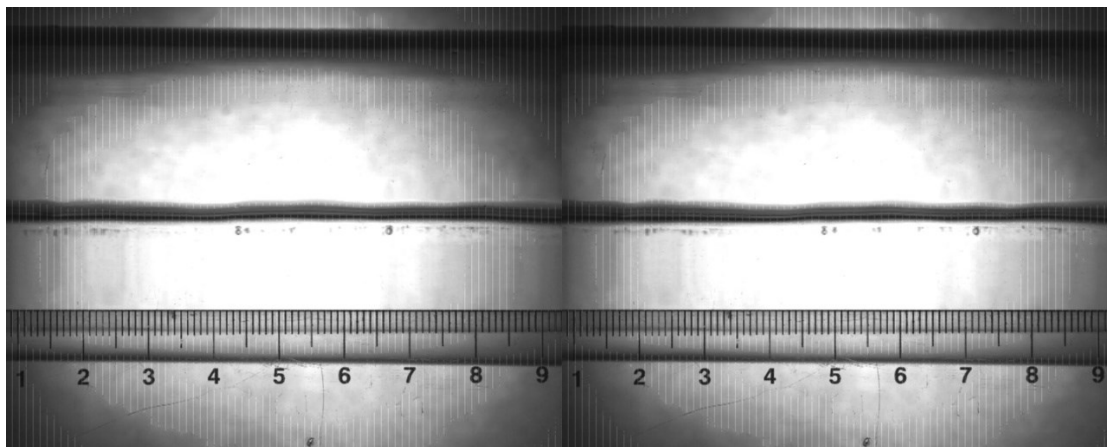


Figura 25- *stratified flow*

## 1.7. Conclusão e trabalhos futuros

Após a realização do experimento, que basicamente foi variar a vazão de ar em relação à vazão de água, constatou-se por intermédio das imagens que constam neste trabalho que foi possível reproduzir os padrões de escoamento conhecidos, de forma representativa e de acordo com os dados literários estudados. Sendo assim, foi possível validar as instalações da bancada de testes para investigações sobre escoamentos bifásicos.

Contudo, notaram-se diversos pontos, os quais carecem de uma atenção com intuito de melhorar os resultados obtidos.

Foi realizada uma investigação em um número relativamente pequeno de pontos. Sendo assim, seria bastante interessante que houvesse um aumento considerável de pontos a serem estudados, principalmente em condições diferentes. Ou até mesmo repetir este experimento, mas utilizando outros fluidos, como por exemplo, ar e óleo, para que seja possível comparar os resultados.

Além disso, outro fator que influenciou no resultado foi à limitação de alguns instrumentos, como por exemplo, da bomba centrífuga e dos medidores de vazão de ar. Desta maneira, seria interessante que realizem posteriormente novos testes experimentais considerando vazões tanto de ar, quanto de água mais elevadas, pois novos padrões seriam reproduzidos.

Conforme foi mostrado no início desse trabalho, existem diversas técnicas para realizar o estudo dos escoamentos. Sendo assim, seria extremamente interessante aprofundar os estudos no resultado obtido pelo *Shadow Sizer* e fazer um comparativo com os demais citados anteriormente, PIV E VLD. Acredito que isto agregaria bastante valor principalmente para indústria petroquímica.

### 1.7.1. Mapa de escoamento



Figura 26– Mapa de arranjos de Taitel e Dukler (1976)

Na figura 26 pode-se observar um exemplo de mapa de arranjos de Taitel e Dukler para tubulações horizontais, indicando os limites de transição entre regimes adjacentes localizados.

Já na figura 27 é possível observar Weisman et al. (1979) que estudaram a influência das propriedades físicas dos fluidos e diâmetro da tubulação em escoamento bifásico horizontal. O mapa de padrões de escoamento resultante foi construído em função das velocidades superficiais do líquido e do gás, e foram introduzidas correlações adimensionais para prever os limites de transição.



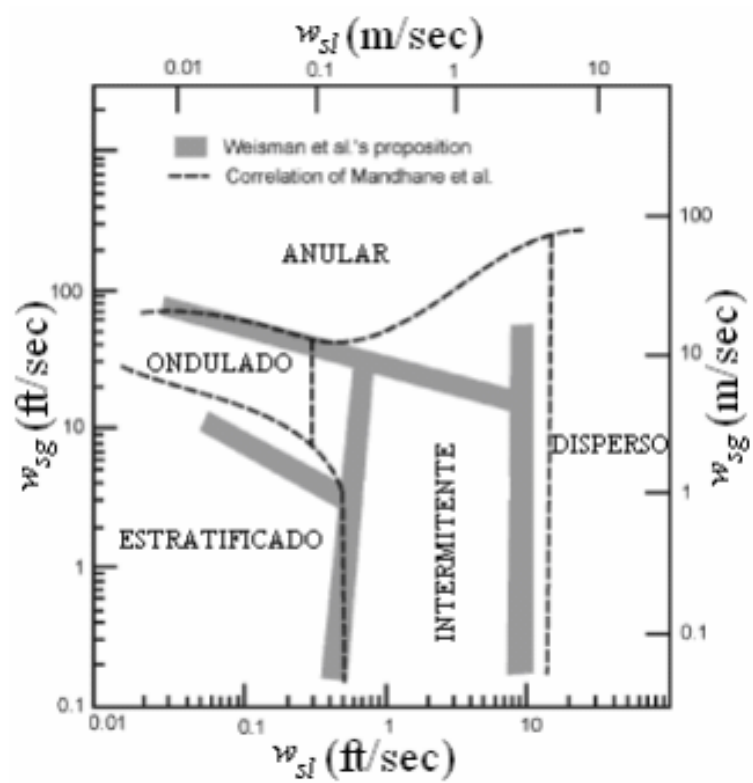


Figura 27- Mapa de arranjos de Weisman et al. (1979)

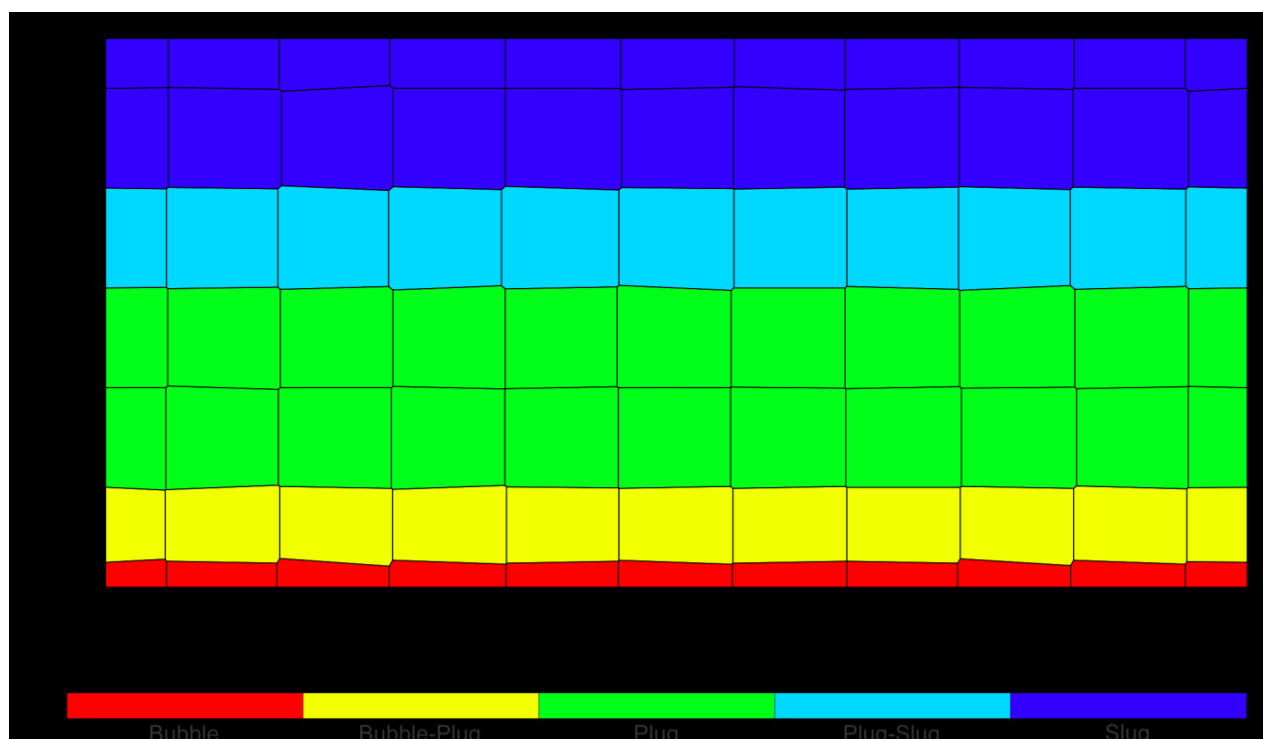


Figura 28- Mapeamento do experimento

Os dois exemplos de mapas de arranjos citados acima diferem nitidamente da figura 28, que foi obtida ao final do experimento. Isto se deve ao fato deles terem utilizados modelos matemáticos complexos, que também devido à falta de tempo e dados, não foi possível de realizar.

Sendo assim, para criar o gráfico em questão os dados obtidos foram discretizados, isto é, o que vemos no gráfico como uma linha não necessariamente é. Não se sabe se o seu comportamento é discreto ou contínuo, mas ao que tudo indica se fosse definido por uma função contínua, possivelmente obteríamos algo próximo ao esperado.

## 1.8.Referências bibliográficas

- [1] FALCONE, G.; HEWITT, G. F.; ALIMONTI, C. **Multiphase Flow Metering, Volume 54: Principles and Applications**. 1ª ed. ELSEVIER, 2009.
- [2] Flow Manager software and introduction to PIV instrumentation". Dantec Dynamics A/S, Fifth Edition, 2000.
- [3] EMERENCIANO, J.R. **Sistema a sensor eletro-resistivo para estudos de escoamentos bifásicos**. Projeto Final de Curso, DEE/POLI/UFRJ, Engenharia Elétrica, 2012.
- [4] AZEVEDO, L.F.A.; ALMEIDA, J.A. **Velocimetria por Imagens de Partículas**. Minicursos, EPTT, 2002
- [5] FERREIRA, V. C. S. F. **Laser Doppler Velocimetria - LDV**. Minicursos, EPTT, 2002
- [6] FREIRE, A.P.S., ILHA, A., COLAÇO, M. J. **Turbulência**. Coleção Cadernos de Turbulência, Volume 5, Tomo 1, 2006.
- [7] OLIVEIRA, L. A. O; FILHO, J. S. C. F.; FACCINI, J. L. H; SU, J. **Visualization of Gas- Liquid flow regimes in horizontal and slightly-inclined circular tubes**. 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2010.
- [8] SILVA, E. S. **Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas**. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, Engenharia de Petróleo, 2006.
- [9] Two Phase Flow Patterns in Horizontal Tubes -Thermal Fluids Central
- [10] SANTOS, A.M.; AZEREDO, C.L.S; GARCÍA, D.A; SILVA,E.; CHACON,I.T.; MARCHESINI,L.F.; FARIAS,M.H. **Validação de bancada experimental para investigação metrológica de escoamento bifásico (ar – água) em tubulação horizontal**. Congresso Brasileiro de Metrologia, 2015.

Anexo A – Registro de medição

REGISTRO DE MEDIÇÃO GERAL Caracterização do Circuito Hidráulico de 50 mm

Requerente: Bancada de Escoramentos Básico (Ar/Água) - Dinam	Data de Início:	Folha: 01
Endereço: Imreito - Xerém	Data de Término:	
Observadores: Rafael da Costa Rocha	Procedimento:	Nº do Processo:

Instrumento: Mapeamento dos Padrões de Escoramento	Modelo/Tipo: 4 Medidores de Vazão de Gás Térmico Mássico
Bomba utilizada: Série PF-17 Dancor - 100 a 250 L/min	Marca: AALBORG; Modelo: GEN37; Nº de Série: 308044-1, 308044-6, 308044-3, 308045-1.
Código de Identificação:	Nº de série: Certificados dos Medidores de Vazão de Ar: TEX: Nº: 13/838 VA, 13/833 VA, 13/836 VA, 13/834 VA.

T. Água	T. Amb.	Unidade	P Entrada (Ar)	P Saída (Ar)	P (Água)	Vazão (Água)	Vazão (Ar)	Ponto do Circuito Hidráulico	Regime de Escoramento
(°C)	(°C)	(%)	(kgf/cm²)	(kgf/cm²)	(bar)	(L/min)	(L/min)	(m)	-
25,2	24,3	72	3,85	0,45	0,0	100,10	5,0	0 a 10	Bubble
								-	-
								0 a 2	Bubble
25,2	24,3	72	3,80	0,50	0,0	99,80	10,0	2 a 10	Transição - Bubble - Plug
								-	-
								0 a 1	Bubble
25,2	24,3	72	3,75	0,60	0,0	100,35	20,0	1 a 3	Transição - Bubble - Plug
								3 a 10	Plug
								0 a 1	Bubble
25,2	24,4	72	3,60	0,65	0,0	100,35	30,0	1 a 3	Transição - Bubble - Plug
								3 a 10	Plug
								0 a 1	Estratificado ondulado
25,2	24,4	72	3,50	0,75	0,0	100,25	40,0	1 a 10	Transição - Plug - Slug
								-	-
								0 a 1	Estratificado ondulado
25,2	24,4	72	3,40	0,90	0,0	100,40	50,0	1 a 10	Transição - Plug - Slug
								-	-
								0 a 2	Estratificado ondulado
25,2	24,4	72	3,20	1,00	0,0	100,25	60,0	2 a 3	Transição - Estratificado ondulado - Slug
								3 a 10	Slug

Observações: Instrumentos Utilizados: Termohigrômetro - Marca: TFA; Modelo: 3030-15; ETM 0013; Certificado: LIT09-00-CC 0110  
1 Medidor de Vazão de Líquidos Eletromagnético - 0 a 20 L/min - Marca: CONVALT; Modelo: IFC 100I OPT KC 1000; Certificado: CONVALT 1408565 R  
5 Manômetros para Ar - Marca: SMC => 3 Manômetros com faixa de 0 a 1,5 Mpa; 1 Manômetro com faixa de 0 a 4 kgf/cm², 1 Manômetro com faixa de 0 a 10 kgf/cm²  
1 Manômetro para Água - Marca: Millimar Faixa: 0 a 10 bar  
Sistema do ShadowSizer composto por Câmera, Lente 65 mm, Software e LED.

Tabela de Conversão de Pressão					
1	(kgf cm²)	=	0,098	(MPa)	0,981 (bar)
1	(MPa)	=	10,197	(kgf cm²)	10,000 (bar)
1	(bar)	=	1,020	(kgf cm²)	0,100 (MPa)

## Anexo B – Relação entre Controle entre Inversor e medidor de vazão

Relação de Controle entre Inversor e Medidor de Vazão (capacidade 250 L/min)				
Pontos de Vazão que o Medidor foi Calibrado	Indicação do Inversor		Variação da Vazão	
(L/min)	(Hertz)	(RPM)	(L/min)	
35	8,7	522	34,93	- 35,10
50	12,2	732	49,79	- 49,86
75	17,9	1074	74,70	- 74,84
100	23,6	1416	99,64	- 99,90
125	29,3	1758	124,92	- 125,10
150	35,0	2100	149,62	- 149,97
175	40,9	2454	175,09	- 175,36
200	46,7	2802	199,84	- 200,13
225	52,7	3162	225,10	- 225,33
250	58,8	3528	249,92	- 250,12

