

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**JORGE GUSTAVO LOPES DUARTE**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO EM UMA  
CÉLULA DE BALANÇO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**GUARAPUAVA**

**2019**

JORGE GUSTAVO LOPES DUARTE

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO EM UMA  
CÉLULA DE BALANÇO**

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Guarapuava, como requisito à obtenção do título de Engenheiro mecânico.

Orientador: Profa. Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva

GUARAPUAVA

2019

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO ESCOAMENTO BIFÁSICO EM**

**UMA CÉLULA DE BALANÇO**

**JORGE GUSTAVO LOPES DUARTE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 09 de agosto de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

**RAQUEL DA CUNHA RIBEIRO DA SILVA**  
Prof. Orientador

---

**LUAN JOSE FRANCHINI FERREIRA**  
Membro Da Banca

---

**PAUL ADRIAN DELDADO MALDONADO**  
Membro Da Banca

---

**ALDO PRZYBYSZ**  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora, Professora Raquel da Cunha Ribeiro Silva, pelo apoio, disponibilidade e confiança durante a realização deste projeto.

Ao Lucas, técnico de laboratório da universidade, que me forneceu todo auxílio que estava ao seu alcance, durante a montagem da bancada de fluídos.

Ao suporte de toda a minha família, em especial meu pai João Bosco Duarte, minha mãe Euclebes Maria Lopes Duarte, meu irmão Pedro Henrique Lopes Duarte e minha namorada Ana Vanessa D'Avila Penteado.

## RESUMO

DUARTE, Jorge Gustavo Lopes. Análise experimental do escoamento bifásico em uma célula de balanço. 2019. 71f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

Os escoamentos bifásicos, gás-líquido, são comuns nas indústrias de petróleo e gás, nuclear e química. Os padrões de escoamentos são modificados conforme há uma variação das condições operacionais tais como as dimensões das tubulações, propriedades físicas dos fluidos e as vazões das fases. Por exemplo, na produção de petróleo, o padrão mais frequente seria o de golfadas, no qual se tem uma região gasosa (bolhas com alongamento) e uma região contínua de líquido, mais conhecida como região de pistão. Neste trabalho foi desenvolvido um estudo experimental para analisar o escoamento bifásico em uma célula de balanço. Para a construção desta célula, foi necessário desenho feito em CAD (desenho assistido por computador), para imprimi-lo foi utilizado filamento PLA em impressora 3D. Foi utilizado dois tubos de acrílico, com 21 milímetros de diâmetro interno com 1 metro de comprimento e outro com 46,2 de diâmetro interno e 1 metro de comprimento, posicionados na horizontal, com leve mudanças de direção. A câmera de alta resolução foi posicionada na região de interesse, e a iluminação foi ajustada, para poder visualizar com clareza o objeto de estudo e posteriormente ligar o mecanismo. Para os testes foram utilizados dois fluidos, água e ar, e os parâmetros variados foram a velocidade que o tubo se movia e o volume de água. Os teste foram realizados no laboratório de vibrações da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em Guarapuava. Com os resultados, foi possível analisar a fração de vazio e a velocidade da bolha. Nesse contexto, no presente trabalho foi desenvolvido um estudo experimental do escoamento bifásico líquido-gás tubo de acrílico com leve mudança de inclinação. Para as incertezas, foi realizado uma análise de erro.

### **Palavras-chave**

Escoamento bifásico. Rocking-Flow cell (RFC). Escoamento com mudança de inclinação.

## ABSTRACT

DUARTE, Jorge Gustavo Lopes. Experimental analysis of the biphasic in a rocking-flow cell. 2019. 71f. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2019.

The gas-liquid biphasic flows are common in the oil and gas, nuclear and chemical industries. The flow patterns are modified as there is a variation of the operating conditions such as the dimensions of the pipes, physical properties of the fluids and the flows of the phases. For example, in petroleum manufacture, the most frequent pattern would be gaps, in which there is a gaseous region (bubbles with stretching) and a continuous region of liquid, better known as a region of piston. In this work an experimental study was developed to analyze the biphasic flow in a balance cell. For the construction of this cell, it was necessary drawing made in CAD (computer aided design), to print it was used filaments PLA in 3D printer. Two acrylic tubes were used, with a 21 mm internal diameter of 1 meter in length and 46 mm in internal diameter and 1 meter in length, positioned horizontally, with slight changes of direction. The high-resolution camera was positioned in the region of interest, and the lighting was adjusted so that the object of study could be clearly visualized and then the mechanism could be switched on. For the tests two fluids, water and air were used, and the varied parameters were the speed that the tube moved and the volume of water. The tests were carried out in the vibration laboratory of the Universidade Tecnológica Federal do Paraná, in Guarapuava. With the results, it was possible to analyze the vacuum / liquid fraction and the velocity of the bubble. In this context, in the present work an experimental study of the biphasic flow liquid-gas acrylic tube with slight change of inclination was developed. For the uncertainties, an error analysis was performed.

### **Key – words**

Biphasic flow. Rocking-Flow cell (RFC). Flow with slope change.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo de uma linha bloqueada por deposição de parafinas.....	12
Figura 2: Remoção da parafina com o uso de Pigs.....	13
Figura 3: Dutos horizontais e seus padrões de escoamento. ....	14
Figura 4: Diagrama de fase da água.....	17
Figura 5: Diagrama de fase do petróleo. ....	19
Figura 6: Diagrama do petróleo negro.....	22
Figura 7: Curva de encolhimento do petróleo negro.....	22
Figura 8: Diagrama do petróleo de baixo encolhimento.....	23
Figura 9: Curva de encolhimento do petróleo de baixo encolhimento.....	23
Figura 10: Diagrama do petróleo volátil. ....	24
Figura 11: Curva de encolhimento do petróleo volátil.....	24
Figura 12: Diagrama do petróleo próximo ao ponto crítico.....	25
Figura 13: Curva de encolhimento do petróleo próximo ao ponto crítico.....	25
Figura 14: Ilustração de um mapa de fluxo. ....	26
Figura 15: Tubo horizontal em um escoamento de Bolhas dispersas. ....	27
Figura 16: Tubo horizontal em um escoamento Estratificado liso. ....	27
Figura 17: Tubo horizontal em um escoamento Estratificado Ondulado.....	28
Figura 18: Tubo horizontal em um escoamento Bolhas alongadas. ....	28
Figura 19: Tubo horizontal em um escoamento Anular. ....	29
Figura 20: Tubo horizontal em um escoamento Anular Ondulado. ....	29
Figura 21: Tubo horizontal em um escoamento de Golfadas.....	30
Figura 22: Tubo horizontal em um escoamento de Golfadas com comprimentos da célula unitária, pistão de líquido e bolha alongada. ....	32
Figura 23: Representação de um sensor capacitivo.....	37
Figura 24: Sonda condutiva do tipo agulha.....	38
Figura 25: Representação de um sensor wire-mash.....	39
Figura 26: Esboço da bancada experimental em centímetros.....	42
Figura 27: Bancada real no laboratório da UTFPR-Guarapuava. ....	43
Figura 28: <i>Representação dos tubos de acrílico</i> . ....	44
Figura 29: Tubos de ensaios de acrílico usados no trabalho. ....	44

Figura 30: Refletor externo de LED. ....	45
Figura 31: Suporte flexível. ....	45
Figura 32: <i>Câmara utilizada para captação das imagens</i> . ....	46
Figura 33: <i>Mecanismo de balanço</i> . ....	47
Figura 34: Motor c.c acoplado dentro do mecanismo de balanço. ....	47
Figura 35: Tacômetro ....	48
Figura 36: Imagem com o tratamento. ....	49
Figura 37: Movimento cinemático das bolhas. ....	50
Figura 38: Comparação entre tubos 1. ....	52
Figura 39: Comparação entre tubos 2. ....	52
Figura 40: Comparação entre tubos 3. ....	53
Figura 41: Comparação entre tubos 4. ....	54
Figura 42: Comparação entre tubos 5. ....	54
Figura 43: Comparação entre tubos 6. ....	55
Figura 44: Comparação entre tubos 7. ....	55
Figura 45: Comparação entre tubos 8. ....	56
Figura 46: Comparação entre tubos 9. ....	56
Figura 47: Bolha alongada que será estudada. ....	57
Figura 48: Posição do nariz da bolha. ....	58
Figura 49: Intervalo de tempo de aparecimento da bolha. ....	58
Figura 50: Representação da posição inicial e final do nariz da bolha. ....	60
Figura 51: Fração de vazio da passagem da bolha ....	62



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista de equipamentos da bancada de fluído.....	41
Tabela 2: Grades de testes.....	51
Tabela 3: Porcentagem de água e ar dentro do tubo.....	62

## LISTA DE SÍMBOLOS

	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$A$	Área da seção transversal do tubo	$[m^2]$
$C_0$	Parâmetro de distribuição	$[-]$
$C_\infty$	Parâmetro de deslizamento	$[-]$
$D$	Diâmetro do tubo	$[m]$
$E_o$	Número de Eötvös	$[-]$
$f$	Frequência da célula unitária	$[Hz]$
$Fr_j$	Número de Froude	$[-]$
$g$	Aceleração da gravidade	$[m \cdot s^{-2}]$
$h$	Constante de esteira	$[-]$
$J$	Velocidade da mistura	$[m \cdot s^{-1}]$
$J_G$	Velocidade superficial do gás	$[m \cdot s^{-1}]$
$J_L$	Velocidade superficial do líquido	$[m \cdot s^{-1}]$
$L_B$	Comprimento da bolha	$[m]$
$L_S$	Comprimento do pistão	$[m]$
$\dot{Q}_G$	Vazão volumétrica do gás	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{Q}_L$	Vazão volumétrica do líquido	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$R_G$	Fração de vazio	$[-]$
$T_P$	Tamanho de cada pixel	$[m/pixel]$
$t_B$	Tempo da bolha para passar pela seção transversal do tubo	$[s]$
$t_S$	Tempo do pistão para passar pela seção transversal do tubo	$[s]$
$V$	Velocidade	$[m \cdot s^{-1}]$
$V_B$	Velocidade de uma bolha alongada	$[m \cdot s^{-1}]$
$\rho_G$	Massa específica do gás	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\rho_L$	Massa específica do líquido	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\theta$	Inclinação	$[rad]$
$\sigma$	Tensão superficial	$[Pa]$
$\delta$	Incerteza	$[-]$
$m'$	Representação de medida	$[mm]$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>15</b>
2.1 GERAL .....	15
2.2 ESPECÍFICO .....	15
2.3 JUSTIFICATIVA .....	15
2.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	15
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
3.1 DIAGRAMA DA MUDANÇA DE FASE DA ÁGUA .....	17
3.2 DIAGRAMA DA MUDANÇA DE FASE DO PETRÓLEO .....	18
3.2.1 RESERVATORIO DE PETRÓLEO .....	20
3.2.2 CLASSIFICAÇÃO DO PETRÓLEO .....	21
3.3 MAPA DE FLUXO .....	26
3.4 ESCOAMENTOS EM BOLHAS OU BOLHAS DISPERSAS–BUBBLY FLOW .....	26
3.5 ESCOAMENTOS ESTRATIFICADOS LISO OU SUAVE - STRATIFIED SMOOTH FLOW .....	27
3.6 ESCOAMENTOS ESTRATIFICADOS ONDULADO – STRATIFIED WAVE FLOW .....	27
3.7 ESCOAMENTOS BOLHAS LONGADAS OU TAMPÃO – PLUG FLOW .....	28
3.8 ESCOAMENTOS ANULAR – ANNULAR FLOW .....	28
3.9 ESCOAMENTOS ANULAR ONDULADO – ANNULAR WAVE FLOW .....	29
3.10 ESCOAMENTOS INTERMITENTES EM GOLFADAS – SLUG FLOW .....	29
3.11 VELOCIDADE SUPERFICIAL DA MISTURA .....	30
3.12 COMPRIMENTO DO PISTÃO DE LÍQUIDO E COMPRIMENTO DA BOLHA ALONGADA .....	31
3.13 VELOCIDADE DE UMA BOLHA LONGADA .....	32
3.14 FREQUÊNCIA .....	35
3.15 FRAÇÕES DE GÁS NO PISTÃO DE LÍQUIDO E NA BOLHA LONGADA .....	36
<b>4 SENSORES DE PASSAGEM DE FASE</b> .....	<b>36</b>
4.1 SENSORES DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA .....	36
4.1.2 SENSORES CAPACITIVOS .....	37
4.1.3 SENSORES RESISTIVOS .....	38
4.2 SENSORES WIRE-MESH .....	38
<b>5 MATERIAL E MÉTODO</b> .....	<b>40</b>
5.1 CÉLULA DE BALANÇO - <i>ROCKING FLOW CELL</i> .....	40
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DA BANCADA .....	40

5.2.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO .....	41
5.3 PROJETO .....	42
<b>6 RESULTADOS .....</b>	<b>48</b>
6.1 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS OBTIDAS PELA CÂMERA .....	48
6.2 MOVIMENTO CINEMÁTICO DAS BOLHAS .....	49
6.3 GRADES DE TESTES.....	51
6.4 POSIÇÃO DO NARIZ DAS BOLHAS ALONGADAS .....	57
6.5 VELOCIDADE DA BOLHA ALONGADA .....	59
6.6 REALIZANDO OS CÁLCULOS .....	59
6.6.1 CÁLCULO DA VELOCIDADE DA BOLHA .....	59
6.6.2 CÁLCULO DA FRAÇÃO DE VAZIO.....	61
<b>7 CONCLUSÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Escoamento bifásico é um escoamento no qual duas fases (gás, líquido ou sólido) escoam simultaneamente em uma região. Ou seja, é o escoamento de uma mistura de fases, como gás (bolhas) em líquido, líquido (gotas) em gás ou sólido (poeira) em gás, basicamente é um fluxo simultâneo de mais de uma fase de fluido. O petróleo é um produto com grande valor e demanda que assim acaba se esgotando parcialmente em alguns locais terrestres fazendo com que alguns países necessitam buscar uma solução ou alternativa que seria a exploração em alto mar. Com essas operações “Offshore” ou seja afastadas da costa, as linhas de transporte de fluidos estão sujeitas a altas pressões e baixas temperaturas bem diferente do que é feito na exploração em terra, dificultando assim sua extração (THOMAS, 2004).

Devido a essas condições ambientais bastante extremas somado à presença da grande quantidade de água e gás pode se ter formação de parafina (hidrato) no interior dos tubos de transporte de óleo. Essa formação de hidrato faz com que as linhas de transporte percam rendimento, pois o tubo fica basicamente entupido, e para conseguir fazer a extração do óleo seria necessário mais potência por conta da perda de carga e conseqüentemente aumenta o custo para o êxito do processo

A formação de parafina ocorre pela conexão de água com um gás a altas pressões e baixas temperaturas. Em condições de 1 atm e 273 K em 1 m<sup>3</sup> de hidrato de metano pode se ter aproximadamente 163 m<sup>3</sup> de gás metano (SLOAN, 2004). Os compostos que mais formam parafina dentro de um tubo de transporte de óleo e gás seriam o metano, etano, propano e o gás carbônico (SLOAN et.al, 2007).

**Figura 1: Linha bloqueada por deposição de parafina.**



**Fonte: REIS, 2015.**

Em razão deste problema a indústria de petróleo tenta corrigi-lo por meio de mecanismos de prevenção, um desses mecanismos seria o uso de inibidores que foram classificados como: cinéticos, termodinâmicos e anti-aglomerantes. Os inibidores cinéticos interferem no começo da formação da parafina diminuindo a formação. Já os inibidores termodinâmicos tem como objetivo causar uma desorganização entre as moléculas de água e assim dificultar a formação de parafina. E o último inibidor, o anti-aglomerantes não deixa que os hidratos se acumulem. (CHANDRAGUPHTHAN,2011).

Segundo Paschoa (2013), o método mais eficiente encontrado atualmente seria o uso de pigs, que no caso o nome é dado pela comparação do nome animal “porco”, pois entram limpos na tubulação e saem sujos no fim da limpeza. São equipamentos de aço e material sintético como borrachas e são conhecidos como raspadores de linha, que são introduzidos nas tubulações e deslocados pelo próprio fluido em escoamento ou por outro fluido injetado com essa finalidade, tendo como objetivo remover as parafinas depositadas.

**Figura 2: Remoção da parafina com o uso de Pigs.**



**Fonte: PASCHOA,2013.**

Engenheiros e pesquisadores tentam dia após dia, melhorar e otimizar o tempo de produção de petróleo e gás, fazendo estudos e experimentos do padrão de escoamento do líquido e do gás presente na tubulação, que será um dos temas mais importante abordado neste estudo.

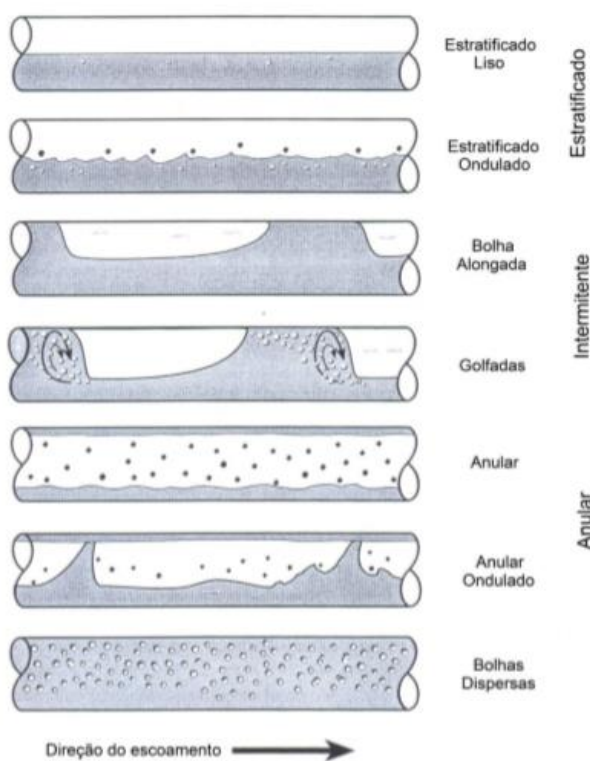
Segundo Alves (2015), ao longo do escoamento, desde o poço até a plataforma, a mistura bifásica de líquido e gás assume diferentes formas e distribuições no interior do tubo, que estão diretamente relacionadas com as vazões das fases do escoamento, as propriedades físicas dos fluídos e a geometria do tubo. Essas distribuições geométricas são chamadas de padrões de escoamento (Shoham ,2006).

No decorrer do escoamento bifásico, de líquido e gás, na direção horizontal deve ser assimétrico, ou seja, o líquido fica no fundo da tubulação por ser mais denso

e o gás na parte superior do tubo. Dependendo da vazão de líquido e gás dentro do tubo pode se ter diferentes padrões de escoamentos. Como mostrado na Figura 3 abaixo.

Para padrões de “Golfadas” a vazão da fase do líquido e gasosa são moderadas, no caso do padrão “Anular” e “Anular Ondulado” há baixas vazões para fase do líquido e altas vazões para fase do gás, para os padrões de “Bolhas Dispersas” teriam baixas vazões da fase gasosa e altas na fase líquida, no escoamento estratificado liso e ondulado teriam baixas vazões tanto na fase líquida como na fase gasosa, e por último as bolhas alongadas teriam vazão de fase líquida média com baixa vazão de fase gasosa (SHOHAM,2006).

**Figura 3: Dutos horizontais e seus padrões de escoamento.**



**Fonte: Modificado de SHOHAM,2006.**

Devido a importância do fenômeno da formação da parafina, o estudo e entendimento da hidrodinâmica e comportamento do escoamento bifásico se tornam relevantes para futuras simulações e modelos da formação do hidrato, por isso a análise experimental da célula de balanço auxilia no procedimento do estudo de tal fenômeno.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 GERAL

O objetivo do trabalho é desenvolver uma bancada experimental do tipo *Rock-flow cell*, na qual será estudada a hidrodinâmica entre cada uma das fases, líquida e gasosa, presentes na célula de balanço.

### 2.2 ESPECÍFICO

- Desenvolver uma bancada experimental do tipo Rock-Flow cell no laboratório de vibrações da UTFPR - Guarapuava.
- Tratamento de imagem utilizando o Autocad 2019 estudantil e o GoPro Studio.
- Comparação das imagens de acordo com o diâmetro do tubo, seu volume de água e velocidade que se movimenta.
- Cálculos da velocidade da bolha e a fração de vazio dentro do tubo.
- Análise de erros.

### 2.3 JUSTIFICATIVA

O padrão de escoamento bifásico é amplamente estudado na área de produção de petróleo, assim também como em outras áreas da indústria tais como nuclear e química. Demandando que o entendimento dos diferentes padrões de escoamento presentes dentro de uma tubulação de escoamento bifásico sejam compreendidas. Nesse experimento será estudado a hidrodinâmica de cada uma das fases, líquida e gasosa, e as suas velocidades.

Os resultados obtidos do experimento podem ser avaliados de forma qualitativa, utilizando o modelo de reconstrução que é similar ao obtido pelas imagens do experimento, que será utilizado um tratamento de imagem no computador.

### 2.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho será dividido nas seguinte ordem, no 1º capítulo foi realizado uma introdução sobre o escoamento bifásico em golfadas com mudança de



direção apontando importâncias em aplicações industriais. No 2° capítulo foram apresentados os objetivos, justificativas e a organização do trabalho. Já no 3° capítulo será feita um referencial teórico sobre os diagramas de mudança de fase da água e do petróleo, além do que seria e como calcular um escoamento de golfadas e quais são suas propriedades. No 4° capítulo foi feito para falar sobre os sensores de passagem de fase. No 5° é escrito sobre o material e os métodos utilizados para fazer a bancada de fluidos. No 6° será apresentado os resultados obtidos com o estudo feito na bancada de *Rocking-flow cell* e por fim no 7° a conclusão.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

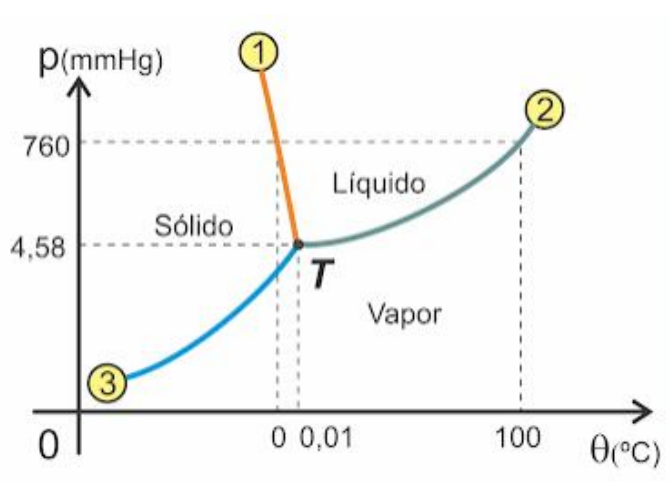
Nesse tópico será abordado, os diagramas de mudança de fase da água e do petróleo, o mapa de fluxo e os padrões de escoamento existentes. Logo após será estudado parâmetros característicos do escoamento intermitentes em golfadas como: velocidades superficiais de líquido e gás, velocidades das bolhas alongadas, frequência e sua fração de vazio tanto na bolha quanto no pistão. Também será abordada o escoamento estratificado e anular que são padrões de escoamentos em um tubo horizontal e quase horizontal.

#### 3.1 DIAGRAMA DE MUDANÇA DE FASE DA ÁGUA

Observa-se, na figura 4, que a água, transforma-se em gelo funde-se a 0 °C, somente se a pressão sobre ela for de 1 atm. A uma pressão maior esse fundir-se a uma temperatura inferior a 0 °C. Ou seja, no caso em tubulações, as quais apresentam elevadas pressões é necessário um cuidado maior, para que não ocorram entupimentos provocados pela formação do gelo.

“Um diagrama de fases é um “mapa” que mostra quais fases são as mais estáveis nas diferentes composições, temperaturas e pressões.” (Ferraro (2015) apud CALLISTER,2008)

Figura 4: Diagrama de fase da água.



Fonte: FERRARO,2015

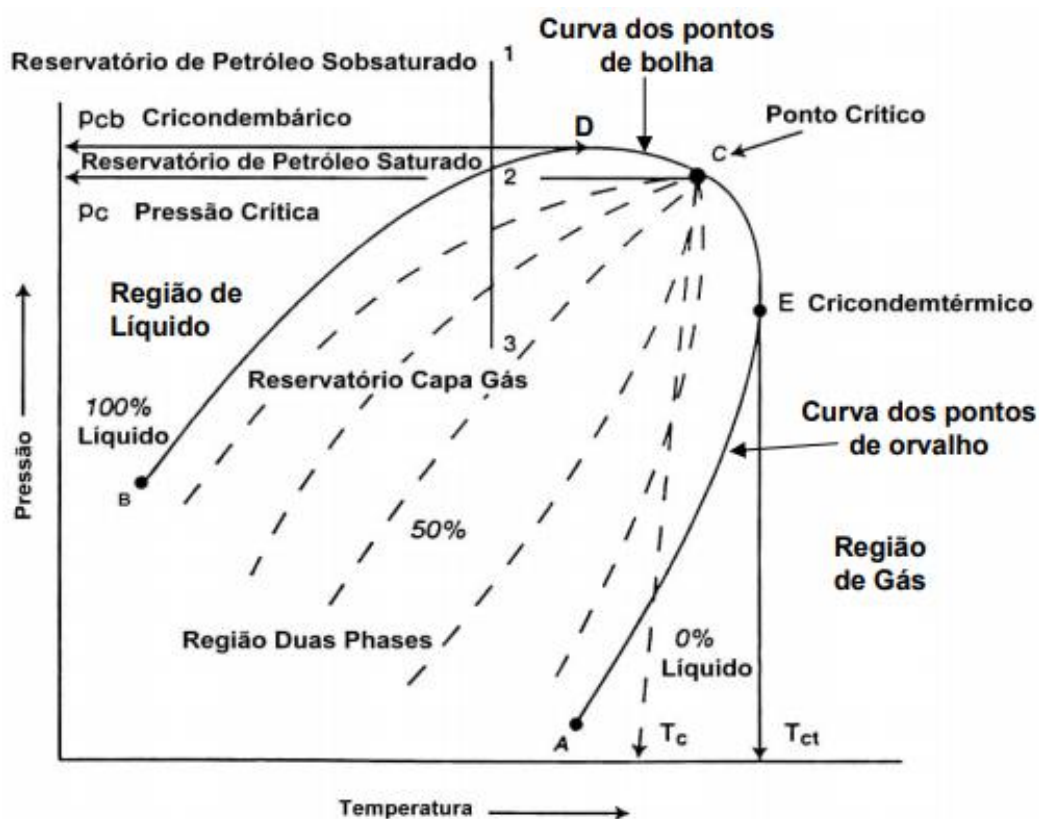
Conforme Ferraro (2015) as curvas referentes a figura 4 são explicados abaixo:

- Curva de fusão (1): “Delimita as regiões correspondentes às fases sólida e líquida. Cada ponto dela é representativo de um estado de equilíbrio entre essas fases”.
- Curva de Vaporização (2): “Delimita as regiões correspondentes às fases líquida e de vapor. Cada ponto dela é representativo de um estado de equilíbrio entre essas fases.”
- Curva de Sublimação (3): “Delimita as regiões correspondentes às fases sólida e de vapor. Cada ponto dela é representativo de um estado de equilíbrio entre essas fases.”
- Ponto triplo (T): “Estado comum às três curvas; é representativo do equilíbrio entre as três fases da substância”.
- Ponto Crítico (C):Mostrado na figura 5 é o “Estado em que corresponde à mais alta temperatura em que a substância é um vapor. Vapor ( $\theta \leq \theta_c$ ): liquefaz-se por compressão isotérmica. Gás ( $\theta > \theta_c$ ): não se liquefaz por compressão isotérmica.”

### 3.2 DIAGRAMA DE MUDANÇA DE FASE DO PETRÓLEO

Os diagramas de fase, de modo geral, servem para classificar o reservatório, definir naturalmente o sistema de hidrocarboneto e descrever o comportamento de fase do fluido de reservatório. A figura 5, abaixo, mostra os detalhes de um diagrama de fase de uma mistura de hidrocarbonetos. (GUITERAS,2003). No projeto será estudado inicialmente utilizando água e ar, posteriormente será feito o estudo com petróleo por isso é necessário estudar os seus diagramas de fases.

**Figura 5: Diagrama de fase do petróleo.**



**Fonte: GUIERAS, 2003.**

A cada ponto no gráfico da Figura 5, tem-se uma fase em pressões e temperaturas diferentes.

Segundo Guiteras (2003) o diagrama de fase do petróleo apresenta os seguintes pontos:

- Fase envolvente: seria a união entre as curvas dos pontos de orvalho e dos pontos de bolhas onde existe gás e líquido em equilíbrio.
- Linhas de qualidade: São as linhas pontilhadas dentro do diagrama. Seu papel, é descrever as condições de temperatura e pressão para volumes iguais de líquidos e pressão. Nota-se que no ponto crítico essas linhas convergem.
- Ponto crítico (ponto C): Seria o ponto onde a linha do ponto de orvalho e a linha do ponto de bolha se juntam, ou seja, onde a propriedade do gás e do líquidos são iguais.

- Ponto cricondentérmico (ponto E): Ponto de temperatura máxima que ainda existe duas fases em equilíbrio.
- Ponto cricondenbárico (ponto D): “É o ponto de pressão máxima em que ainda existem duas fases em equilíbrio.”
- Curva ponto de bolha (linha BC): Linha que separa a região líquida da região de duas fases.
- Curva ponto de orvalho (linha AC): Linha que separa a região de vapor da região de duas fases.

### 3.2.1 RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO

Para ser classificado como reservatório de petróleo, Guiteras (2003) diz que, a temperatura crítica ( $T_c$ ) do fluido tem que ser maior que a temperatura do reservatório  $T$ . Tomando de base a pressão inicial do reservatório  $p_1$ , os reservatórios de petróleo podem ser sub-classificados nas seguintes categorias:

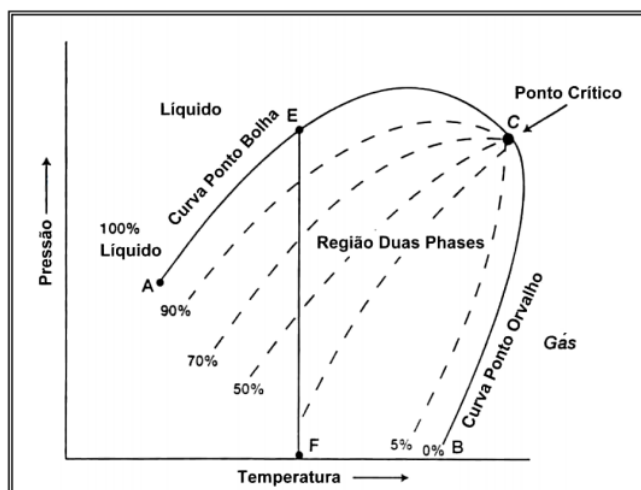
- Reservatório de petróleo subsaturado: Quando a pressão inicial do reservatório  $p_i$ , mostrado na figura 5 pelo ponto 1, é a maior que a pressão no ponto bolha e a temperatura está abaixo temperatura crítica do fluido.
- Reservatório de petróleo saturado: Quando a pressão inicial do reservatório atinge o ponto de bolha do fluido do reservatório, mostrado no ponto 2 da figura 5.
- Reservatório de capa de gás: chamado de reservatório de duas fases, contém uma zona de líquido ou de petróleo com uma zona ou capa de gás na parte superior, seria se a pressão inicial do reservatório é menor que a pressão no ponto de bolha do fluido do reservatório como indicado no ponto 3 da figura 5.

### 3.2.2 CLASSIFICAÇÃO DO PETRÓLEO

Segundo Guiteras (2003), existem quatro tipos de petróleo conhecidos: o petróleo negro, petróleo de baixo encolhimento, petróleo de alto encolhimento (volátil) e o petróleo próximo ao ponto crítico, sendo que cada um definido por:

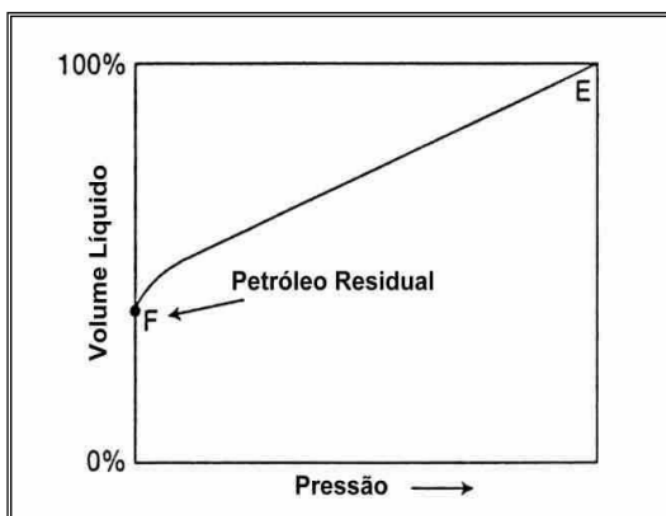
- Petróleo negro: na figura 6 abaixo, pode-se notar a temperatura de um petróleo negro no qual as linhas de qualidade estão equidistantes caracterizando assim uma fase de petróleo negro. E na figura 7, nota-se que a curva de encolhimento do líquido se aproxima de uma reta. “No tanque de armazenamento o petróleo normalmente é de cor marrom a verde escuro”.

**Figura 6: Diagrama do petróleo negro.**



**Fonte: GUITERAS,2003.**

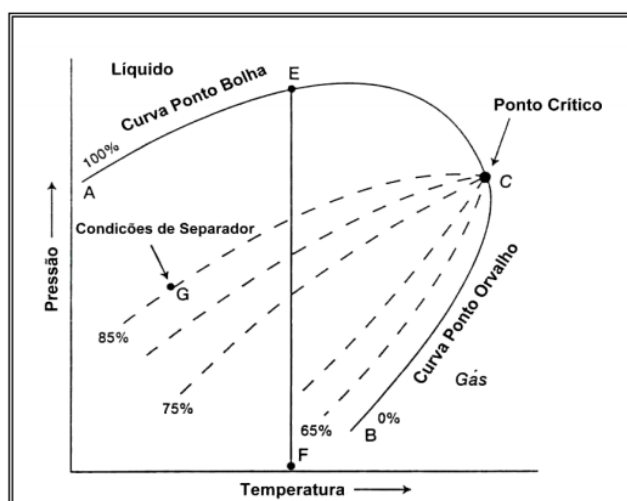
**Figura 7: Curva de encolhimento do petróleo negro.**



**Fonte: GUITERAS,2003**

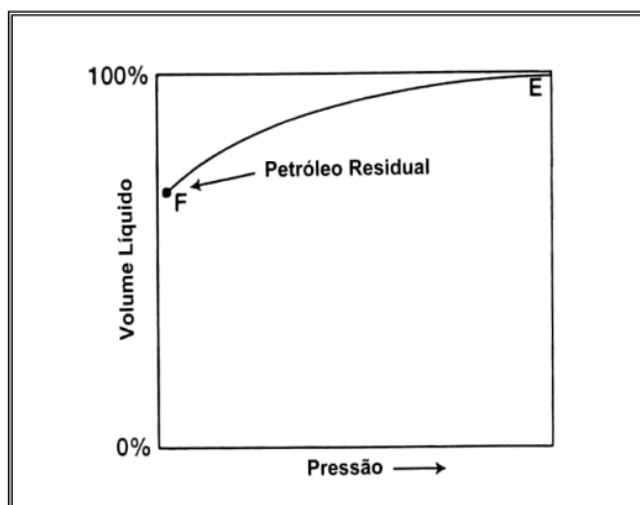
- Petróleo de baixo encolhimento: a temperatura do petróleo de baixo encolhimento é mostrado na figura 8, abaixo, e nota-se que as curvas das linhas de qualidade estão espaçadas estreitamente perto da curva de ponto de orvalho. Já a curva de encolhimento está representado pela figura 9.

**Figura 8: Diagrama do petróleo de baixo encolhimento.**



**Fonte: GUITERAS,2003**

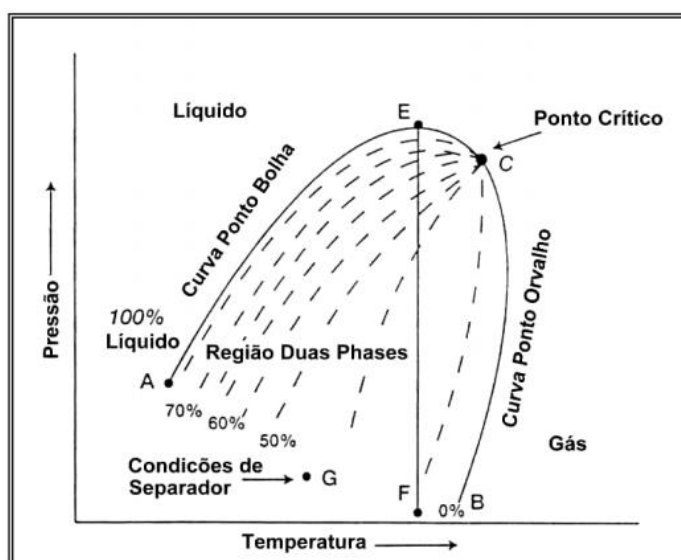
**Figura 9: Curva de encolhimento do petróleo de baixo encolhimento.**



**Fonte: GUITERAS,2003**

- Petróleo volátil (alto encolhimento): O seu digrama de fase será apresentado na figura 10 abaixo. Nele pode notar que a linha de qualidade estão juntas e estreitas, próximo ao ponto de bolha e mais distantes a baixas pressões. Já a sua curva de encolhimento será representada pela figura 11, que pode se observar que abaixo do ponto bolha ela representa um alto encolhimento de líquido.

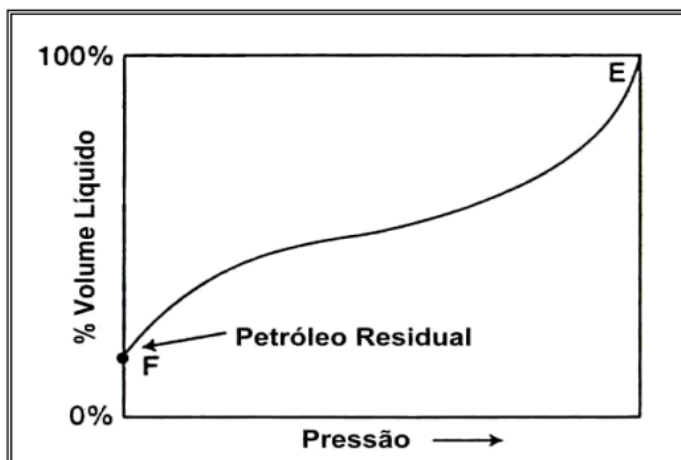
**Figura 10: Diagrama do petróleo volátil**



**Fonte: GUITERAS,2003**



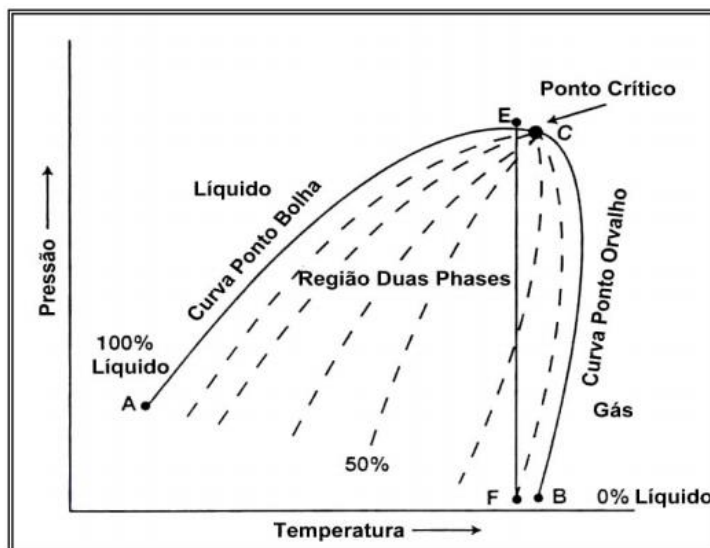
**Figura 11: Curva de encolhimento do petróleo volátil**



Fonte: GUITERAS,2003

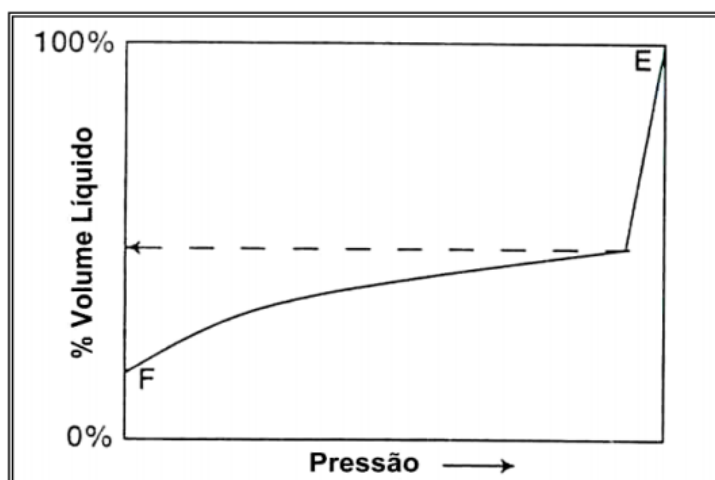
- Petróleo próximo ao ponto crítico: O seu diagrama pode –se ser notado abaixo na figura 12, e nele nota-se que as linhas de qualidades convergem ao ponto crítico. E com isso pode-se ver que as curvas de encolhimento do petróleo próximo ao ponto crítico é mostrado na figura 13 abaixo.

**Figura 12: Diagrama do petróleo próximo ao ponto crítico.**



Fonte: GUITERAS,2003

**Figura 13: Curva de encolhimento do petróleo próximo ao ponto crítico**

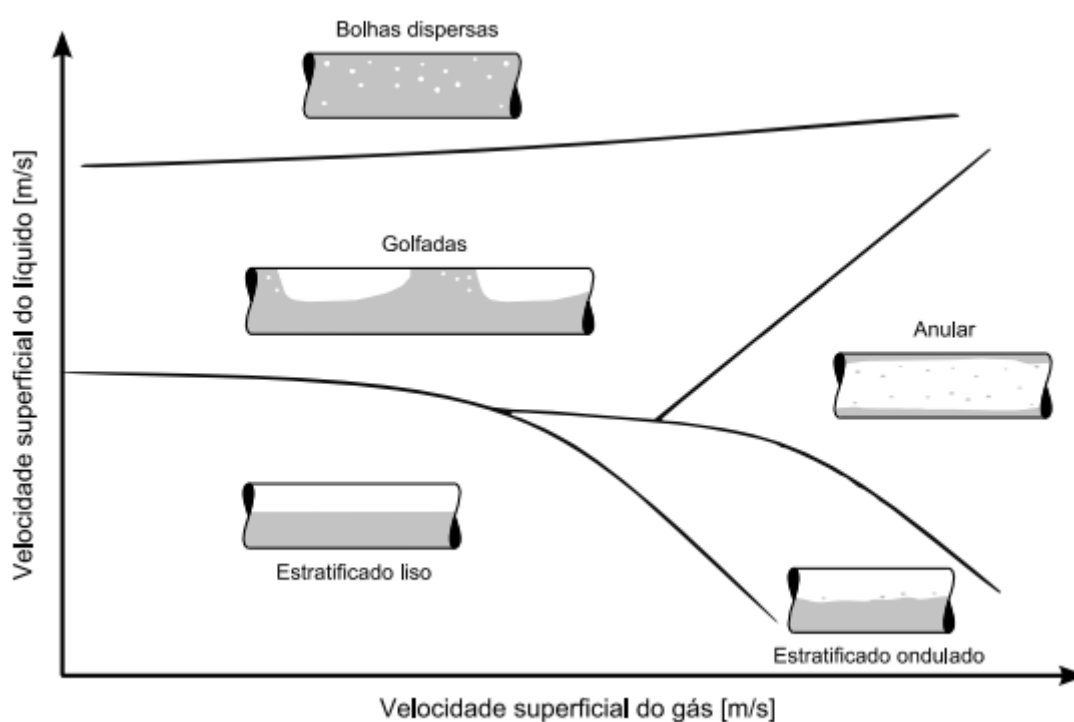


**Fonte: GUITERAS,2003**

### 3.3 MAPA DE FLUXO

Segundo Conte (2014) em um escoamento bifásico sabendo a vazão do gás e do líquido, pode-se prever o tipo ou padrão de distribuição das fases no duto através de mapas de fluxo. Os padrões são classificados como: estratificado liso, estratificado ondulado, bolhas dispersas, escoamento em golfadas, anular, entre outros.

**Figura 14: Ilustração de um mapa de fluxo**



Fonte: CONTE,2014

### 3.4 ESCOAMENTOS EM BOLHAS OU BOLHAS DISPERSAS – BUBBLY FLOW

As bolhas dispersas, tendem a aparecer quando há altas velocidades do líquido e pequena interação de gás e líquido. Por serem menos densas que o líquido as bolhas fluem para a parte de cima do tubo. Pode-se concluir que quanto maior a velocidade do líquido, mais dispersas e menores ficarão as bolhas. (PESSANHA (2014) apud. MENDHANE et al. 1974)

**Figura 15: Tubo horizontal em um escoamento de Bolhas dispersas.**

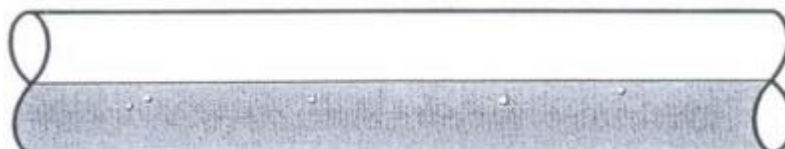


**Fonte: SHOHAM,2006.**

### 3.5 ESCOAMENTOS ESTRATIFICADOS LISO OU SUAVE - STRATIFIED SMOOTH FLOW.

Nos escoamentos estratificados lisos, comumente, ocorre quando há baixas velocidades de líquido e gás. As duas fases são separadas por uma interface suave. (PESSANHA (2014) apud. MENDHANE et al. 1974)

**Figura 16: Tubo horizontal em um escoamento Estratificado liso.**

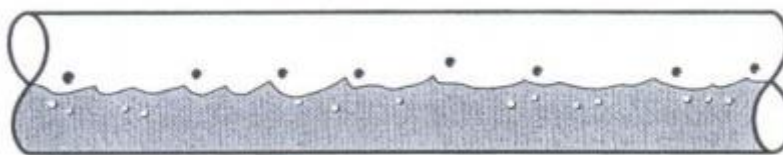


**Fonte: SHOHAM,2006.**

### 3.6 ESCOAMENTOS ESTRATIFICADOS ONDULADO – STRATIFIED WAVE FLOW

Para os escoamentos estratificados ondulados, precisa-se que exista uma baixa velocidade de líquido e gás, porém com a velocidade do gás superior do que na do estratificado liso. As duas fases são separadas por uma interface ondulada, sem tocar na parte superior da tubulação. (PESSANHA (2014) apud. MENDHANE et al. 1974)

**Figura 17: Tubo horizontal em um escoamento Estratificado Ondulado.**

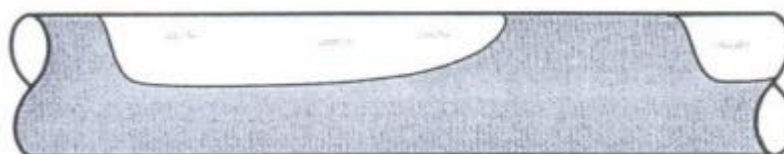


**Fonte: SHOHAM,2006.**

### 3.7 ESCOAMENTOS BOLHAS LONGADAS OU TAMPÃO – PLUG FLOW

As bolhas alongadas surgem com o aumento da velocidade de fluxo, formando tampões ou pistões de líquido, não aerados. Faz parte dos fluxos Intermitentes (PESSANHA (2014) apud. BARNEA et al., 1980).

**Figura 18: Tubo horizontal em um escoamento Bolhas alongadas.**

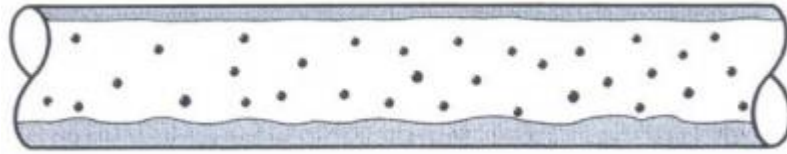


**Fonte: SHOHAM,2006.**

### 3.8 ESCOAMENTOS ANULAR – ANNULAR FLOW

No caso do escoamento anular as velocidades de gás precisam ser altas, o gás se concentra na parte central do duto, com um filme de líquido estável tocando toda a parede da tubulação, formando um anel. Gotículas de água estão dispersas no ar. (PESSANHA (2014) apud. MENDHANE et al. 1974)

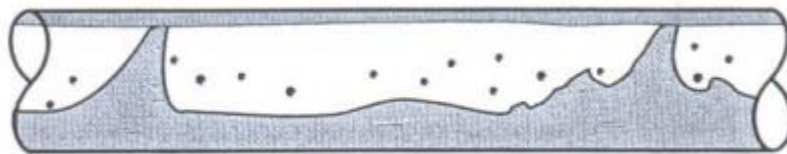
**Figura 19: Tubo horizontal em um escoamento Anular.**



*Fonte: SHOHAM, 2006.*

### 3.9 ESCOAMENTOS ANULAR ONDULADO – ANNULAR WAVE FLOW

O escoamento anular ondulado tem as mesmas propriedades que o escoamento Anular, porém, apresentam velocidades de gás menores.



**Figura 20: Tubo horizontal em um escoamento Anular Ondulado.**

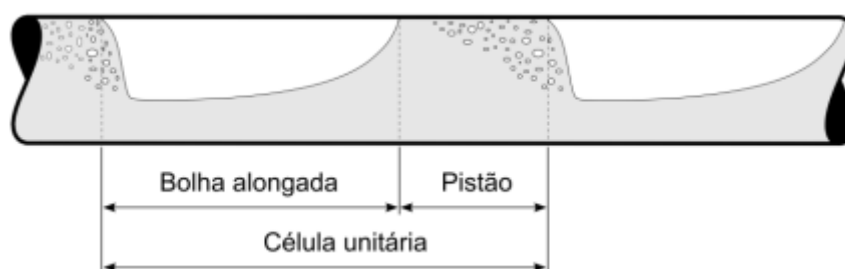
*Fonte: SHOHAM, 2006.*

### 3.10 ESCOAMENTOS INTERMITENTES EM GOLFADAS – SLUG FLOW

O escoamento de Golfadas pode ocorrer em tubos de três modos: verticais, horizontais e inclinado, no qual estão inseridos dentro de um escoamento intermitente.

É definido que a região de uma bolha alongada junto com um pistão de líquido seria chamado de célula unitária. (ALVES (2015) apud. WALLIS(1969)) Essa célula será representada na Figura 21, em um tubo horizontal logo abaixo.

**Figura 21: Tubo horizontal em um escoamento de Golfadas.**



**Fonte: ALVES,2015.**

Dentro de tubos horizontais também existem bolhas alongadas junto com o líquido que ficam na forma de estratificação, pelo líquido ser mais denso do que o gás ele basicamente ficará na parte inferior do tubo, enquanto o gás estará na parte superior (SHOHAM, 2006).

Alves (2015) apud. Dukler e Hubbard (1975), diz que realizaram um estudo em um escoamento de golfadas e fizeram um modelo em que o pistão de líquido teria que estar e escoar em toda parte colateral do tubo em uma alta velocidade, no mesmo momento uma película de líquido teria que mover na frente do pistão em um velocidade relativamente menor.

“O que os dois pesquisadores pretendiam com isso, seria que o pistão de líquido teria que absorver o líquido da película formando uma região de queda de pressão chamada de efeito de esteira. Enquanto isso, quase no mesmo instante é colocado mais líquido na película seguinte e quando eles conseguem colocar mais líquido para próxima película igualando com a porcentagem que ele será capturada pelo pistão, o resultado seria que o comprimento de cada pistão ficaria constante e assim tendo êxito em criar um escoamento em golfadas.” (ALVES, 2015)

Portanto o escoamento de Golfadas é considerado o mais eficiente dentre todos os tipos de escoamentos existentes por conseguir vencer a coluna de água e fazer o transporte do líquido requerido, por exemplo no transporte do petróleo, é o que apresenta melhor rendimento na sua extração.

### 3.11 VELOCIDADE SUPERFICIAL DA MISTURA

Para encontrar as velocidade superficial da mistura ( $J$ ) é necessária encontrar as velocidades superficiais do líquido ( $J_L$ ) e as velocidades superficiais do gás ( $J_G$ ), pois a velocidade superficial da mistura é definida como a soma das outras duas velocidades, mostrado na equação (1).

$$J = J_L + J_G \quad (1)$$

A velocidade superficial do líquido é definido pela divisão da vazão volumétrica de líquido ( $\dot{Q}_L$ ) com a área da seção transversal do tubo ( $A$ ) mostrado na equação (2) abaixo.

$$J_L = \frac{\dot{Q}_L}{A} \quad (2)$$

A velocidade superficial do gás é definido pela razão da vazão volumétrica do gás ( $\dot{Q}_G$ ) com a área da seção transversal do tubo ( $A$ ) mostrado na equação (3).

$$J_G = \frac{\dot{Q}_G}{A} \quad (3)$$

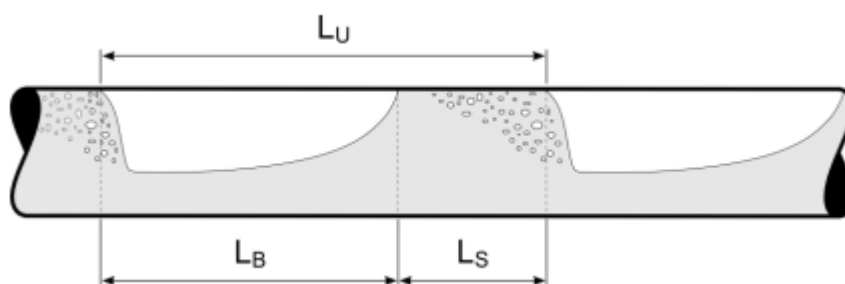
### 3.12 COMPRIMENTO DO PISTÃO DE LÍQUIDO E COMPRIMENTO DA BOLHA ALONGADA

Tanto o pistão quanto a bolha alongada no escoamento transportam quase toda a parte do gás e do líquido dentro do tubo, respectivamente. O comprimento do pistão de líquido será definido como ( $L_S$ ) e o comprimento da bolha alongada como ( $L_B$ ), para encontrar o comprimento da célula unitária ( $L_U$ ), que foi definida por Alves (2015) apud.



Wallis (1969), basta somar o comprimento do pistão de líquido com o comprimento da bolha alongada. Será esquematizado estas informações na Figura 22 abaixo.

**Figura 22: Tubo horizontal em um escoamento de Golfadas com comprimentos da célula unitária, pistão de líquido e bolha alongada.**



Fonte: ALVES,2015

Alves (2015) apud. Dukler e Hubbard (1975), fizeram um estudo no tubo horizontal em um escoamento de golfadas com comprimento de cálculo unitário, pistões de líquido e bolhas alongadas e definiram que o comprimento do pistão seria a distância entre duas bolhas alongadas uma seguida da outra. Além disso viram que quanto mais longe do começo do escoamento, o comprimento do pistão de líquido tende a ser mais estável formando assim um escoamento de Golfadas.

### 3.13 VELOCIDADE DE UMA BOLHA ALONGADA

A velocidade de uma bolha alongada ( $V_B$ ), é um fator para ser utilizado no desenvolvimento de modelos para o escoamento em Golfadas, pois dependendo da velocidade é encontrado o tipo de padrão de distribuição das fases.

Tatitel e Barnea (1990), pesquisaram o cálculo da velocidade de uma bolha alongada. Eles definiram que seria necessário três fatores para tal cálculo que seriam: a velocidade de translação de uma bolha em líquido estagnado, a influência do movimento do líquido que está à frente da bolha e o efeito de redução de pressão que acontece atrás da bolha que está na frente chamado de efeito de esteira. Eles definiram uma fórmula para o cálculo da velocidade de uma bolha alongada que será mostrada na equação (4):

$$V_B = (C_0 J + C_\infty \sqrt{gD})(1 + h) \quad (4)$$

- $C_0$ : Constante adimensional da influência do movimento do líquido que está à frente da bolha.
- $C_\infty$ : Constante adimensional da velocidade de translação de uma bolha em líquido estagnado.
- $h$ : Constante adimensional do efeito de esteira.
- $g$ : Gravidade.
- $D$ : Diâmetro do tubo.
- $J$ : Velocidade da mistura.

Alves (2015) apud. Bendiksen (1984), diz que a constante adimensional  $C_0$ , que está definido na equação 4, pode ser explicada de forma aproximada pela divisão entre as velocidade máxima e média do líquido que está à frente da bolha na tubulação.

Como existem  $C_0$  diferentes para escoamentos laminares e escoamentos turbulentos, Bendiksen (1984) fez alguns experimentos e chegou na seguinte relação:

$$C_0 = \begin{cases} 1,05 + 0,15 \sin^2 \theta & ; Fr_J < 3,5 \\ 1,2 & ; Fr_J \geq 3,5 \end{cases} \quad (5)$$

- $\theta$ : Inclinação do tubo em relação horizontal
- $Fr_J$ : Número de Froude da mistura

O número de Froude da mistura seria definido pela divisão das forças de inércia e forças gravitacionais mostrado na equação 6 a seguir:

$$Fr_J = \frac{J}{\sqrt{gD}} \quad (6)$$

O parâmetro de deslizamento, conhecido como  $C_\infty$ , definido na equação (4) dá o valor da velocidade de uma bolha alongada em um líquido sem movimento.

Alves (2015) diz que, “Este é um fator que muitos pesquisadores da área divergem de opinião pois para Gregory e Scott (1969) e Dukler e Hubbard (1975), por exemplo, dizem que já que força gravitacional não age na direção de um escoamento

horizontal, não teria empuxo para empurrar a bolha que estaria parada dentro do tubo, com isso não existiria  $C_\infty$ . Mas teria outros pesquisadores como Nischolson (1978) e Bendiksen (1984), que defendem que existe o parâmetro de deslizamento pelo fato de existir uma diferença de elevação entre o corpo da bolha alongada e seu nariz”.

Por pensarem que existe um  $C_\infty$  em tubos horizontais, Alves (2015) apud. Weber (1981) e Bendiksen (1984), montaram uma relação para o cálculo do parâmetro de deslizamento mostrado abaixo:

$$C_\infty = 0,54 - 1,76E_o^{-0,56} \quad (7)$$

$$C_\infty = \begin{cases} 0,54 \cos \theta + 0,35 \sin \theta & ; Fr_j < 3,5 \\ 0,35 \sin \theta & ; Fr_j \geq 3,5 \end{cases} \quad (8)$$

- $E_o$ : Número de Eötvös, seria a relação das forças de empuxo e sua tensão superficial definido pela equação 9 abaixo.

$$E_o = \frac{D^2 g (\rho_L - \rho_G)}{\sigma} \quad (9)$$

- $\sigma$ : Tensão superficial.
- $\rho_G$ : Massa específica do gás.
- $\rho_L$ : Massa específica do líquido.

Alves (2015) complementa que, para encontrar a constante de esteira ( $h$ ) que seria uma relação entre a distância das bolhas que aparece graças a velocidade maior do escoamento de Golfadas pela proximidade entre as bolhas, Moissis e Griffith em 1962, fizeram uma relação representada pela equação 10 abaixo:

$$h = a \exp\left(-b \frac{L_S}{D}\right) \quad (10)$$

- $a$ : Constante tabelada utilizado.
- $b$ : Constante tabelada utilizado.

### 3.14 FREQUÊNCIA

Para calcular o valor da frequência ( $f$ ) de uma célula unitária em um escoamento intermitente, que seria no caso quando um observador parado vendo as células se movimentarem em intervalos não frequentes nem no espaço e nem no tempo. É definido que o cálculo se dá por meio da seguinte equação (11):

$$f = \frac{1}{t_B + t_S} \quad (11)$$

- $t_B$  : Tempo da bolha para passar pela seção transversal do tubo.
- $t_S$  : Tempo do pistão para passar pela seção transversal do tubo.

O tempo da bolha para passar pela seção transversal do tubo ( $t_B$ ) em uma célula unitária com velocidade de uma bolha alongada ( $V_B$ ) foi definida pela equação (12) abaixo:

$$t_B = \frac{L_B}{V_B} \quad (12)$$

E o tempo do pistão para passar pela seção transversal do tubo ( $t_S$ ) em uma célula unitária com velocidade de uma bolha alongada ( $V_B$ ) foi definida pela equação (13) abaixo:

$$t_S = \frac{L_S}{V_B} \quad (13)$$

Fazendo uma relação entre as equações (12) e (13) com a equação (11) chegamos na equação (14).

$$f = \frac{V_B}{L_B + L_S} \quad (14)$$

Para Alves (2015), outros pesquisadores como Gregory e Scott (1969) e Heywood e Richardson (1979) fizeram uma relação matemática para frequência em tubulações horizontais baseando-se em métodos experimentais, chegando nas seguintes fórmulas respectivamente:

$$f = 0,0226 \left[ \frac{J_L}{gD} \left( \frac{19,75}{J} + J \right) \right]^{1,2} \quad (15)$$

$$f = 0,0434 \left[ \frac{J_L}{J} \left( \frac{2,02}{D} + Fr_j \right) \right]^{1,02} \quad (16)$$

### 3.15 FRAÇÕES DE GÁS NO PISTÃO DE LÍQUIDO E NA BOLHA ALONGADA

Alves (2015), diz que a fração de vazio ( $R_G$ ) é definido pela área ocupada pelo gás ( $A_G$ ) da seção requerida sobre a área total do tubo (A) chegando na seguinte equação:

$$R_G = \frac{A_G}{A} \quad (17)$$

## 4 SENSORES DE PASSAGEM DE FASE

Neste tópico será abordado, os tipos e a definição dos sensores de passagem de fase, entre eles: os sensores de impedância elétrica e os sensores wire-mesh.

### 4.1 SENSORES DE IMPEDÂNCIA ELÉTRICA

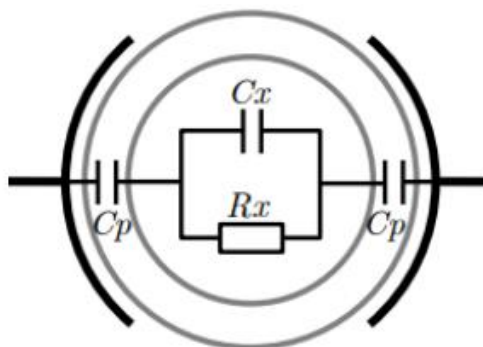
Esta técnica de medição é relacionada diretamente com as diferenças da permissividade e condutividade elétrica, que são fases em análise na tubulação. Estes sensores são classificadas como capacitivas quando forem baseadas na permissividade elétrica e resistivas quando a condutância elétrica é medida. (COUTINHO et al. 2017)

#### 4.1.1 SENSORES CAPACITIVOS

Os sensores capacitivos trabalham em função da diferença de permissividade elétrica das substâncias. O funcionamento é baseado no princípio da emissão e recepção de um sinal elétrico senoidal. Basicamente o sensor trabalha de forma que o sinal elétrico emitido pelo emissor chegue até o receptor e, conforme a permissividade do fluido, esse sinal determina o tipo do fluido estudado. Portanto, pode se concluir que a capacitância neste caso depende diretamente da permissividade elétrica do fluido em questão (COUTINHO et al.2017 apud. SANTOS, 2014).

Nestes sensores é necessário prevenir contra capacitâncias parasitas, então, é aplicado uma blindagem que seja eficaz para manter o sinal sem apresentar ruídos. Um modelo deste sensor capacitivo é apresentado na figura abaixo (23), ele basicamente é simplificado da impedância entre dois eletrodos com seu circuito equivalente que considera a capacitância da parede do tubo ( $C_p$ ), a capacitância ( $C_x$ ) e a resistência equivalentes do fluido ( $R_x$ ) (COUTINHO et al. 2017 apud. LIBERT, 2013).

**Figura 23: Representação de um sensor capacitivo.**



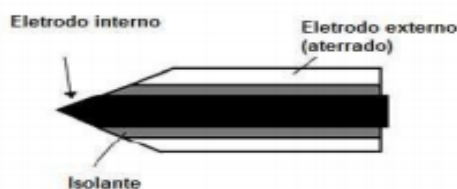
**Fonte: COUTINHO et al. 2017 apud. LIBERT,2013.**

#### 4.1.2 SENSORES RESISTIVOS

Os sensores resistivos, como já dito, seria quando há uma medição de condutividade elétrica, ou seja, medem a condutância dos fluidos, podendo ser aplicados em escoamento em que uma das fases é condutiva (COUTINHO et al apud. SANTOS,2014).

Estes sensores, se caracterizam como uma chave elétrica e basicamente são aplicados em sondas do tipo agulha como mostrado na figura (24) abaixo. Elas medem a condutividade elétrica das substâncias presentes, como a principal vantagem a baixa influência física no escoamento e isso faz com que se reduza as perturbações na estrutura espacial das fases. E são conhecidos pela baixo custo e a alta capacidade de aquisição de dados comparados com outros sensores (COUTINHO et al, 2017).

**Figura 24: Sonda condutiva do tipo agulha.**



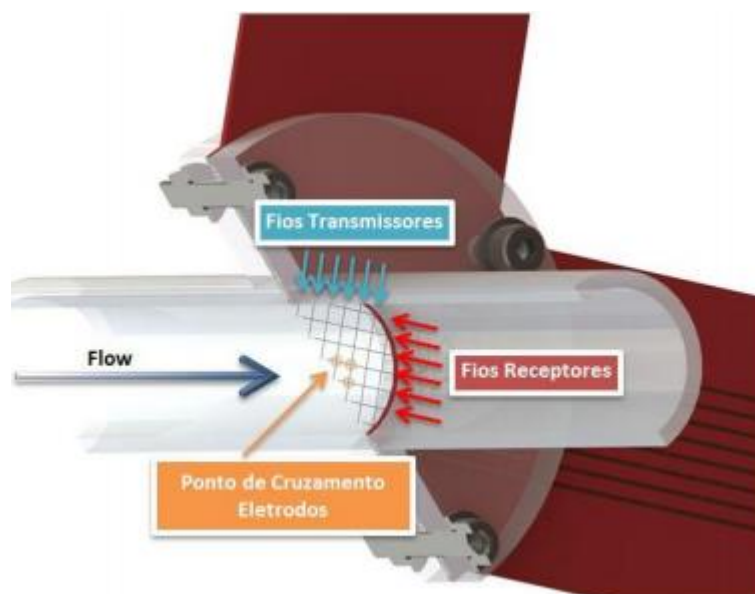
**Fonte: COUTINHO et al, 2017 apud. DA SILVA, 2008.**

## 4.2 SENSORES WIRE-MESH

Os sensores wire-mesh são mais conhecidos como, malhas de eletrodos, que permitem uma visualização de escoamentos com alta resolução temporal e espacial. Ele é representado pela figura (25) abaixo e constituído pelo plano transmissor e o plano receptor, distribuídos ao longo da seção transversal do tubo.

O projeto eletrônico destes sensores, permitem determinar a impedância de cada cruzamento, pois há varreduras em alta velocidade dos eletrodos e cada eletrodo é acionado um por vez (COUTINHO et al, 2017).

**Figura 25: Representação de um sensor wire-mash**



**Fonte: COUTINHO et al SANTOS, 2011.**



## 5 MATERIAL E MÉTODO

Neste tópico foram apresentados os métodos experimentais usados para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiro será apresentado o método utilizado para realização do experimento logo após será mostrado os materiais que serão utilizados para realização da bancada.

### 5.1 CÉLULA DE BALANÇO - *ROCKING FLOW CELL*

Foi construído uma célula de balanço, ou também conhecidas como *Rock-flow cell* (RFC), para analisar a hidrodinâmica do escoamento bifásico.

O RFC é um método muito mais barato e mais fácil de ser realizado com uma melhor visualização e capacidade de controle, do que outros equipamentos encontrados no mercado mundial, porém até hoje a poucos estudos referente a mecânica de fluidos deste sistema.

### 5.2 MATERIAIS UTILIZADOS PARA REALIZAÇÃO DA BANCADA

A bancada experimental foi construída no laboratório de vibrações da UTFPR, campus Guarapuava.

Ela é composta por tubos de acrílico transparente, um mecanismo de balanço que foi feito por uma impressora “3 D”, um motor de corrente contínua com redutor que está acoplado ao mecanismo de balanço, um refletor externo de led 100 W que foi coberto por um papel vegetal para melhor resolução, um suporte flexível para a câmera e por fim, foi instalada uma câmera de alta resolução, com ação em “slow motion” que foi presa ao tubo acompanhando seu movimento.

O RFC é composto por um tubo com água e ar atmosférico em cima de um apoio e seria movimentado por um mecanismo criado no CAD (desenho assistido por computador) com baixa velocidade fazendo com que se produza bolhas dentro do tubo e assim conseguindo visualizar pelo uso da câmera de alta resolução, as imagens das bolhas mais próximas, visualmente, com as encontradas no método de golfadas.

Na Tabela 1 e Figuras 26 e 27 abaixo, foram feitas uma lista de todos os equipamentos utilizados para realização da bancada, um esboço deste projeto e a bancada real que fica dentro da universidade, respectivamente.

Segue a baixo a Tabela 1, que mostra a lista de equipamentos da bancada de fluídos da UTFPR –Guarapuava.

**Tabela 1: Lista de equipamentos da bancada de fluído.**

LISTA DE EQUIPAMENTOS DA BANCADA DE FLUÍDO UTFPR - GUARAPUAVA	
1	TUBO DE ACRÍLICO: 25.5 mm DIÂMETRO EXTERNO X 21 mm DIÂMETRO INTERNO X 1 METRO DE COMPRIMENTO
2	TUBO DE ACRÍLICO: 49.9 mm DIÂMETRO EXTERNO X 46.2 mm DIÂMETRO INTERNO X 1 METRO DE COMPRIMENTO
3	REFLETOR EXTERNO LED 100 W
4	1 KG FILAMENTO PARA IMPRESSORA 3D
5	PRESILHA LACRE PRETA
6	MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA COM REDUTOR
7	FITA ADESIVA
8	SUORTE GO PRO FLEXIVEL
9	PLUGUES DE TOMADA PARA O REFLETOR + CABO DE ENERGIA 1m
10	TUBO DE ENSAIO 600ml
11	GOPRO HERO 3+ SILVER
12	VEDA ROSCA

**Fonte: Autoria própria.**

### 5.2.1 PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO

Para começar o procedimento de medição experimental, foi colocado água no tubo, com um dos 3 volumes explicados no item 5.3, e para não deixar a água vaziar desse recipiente, foi vedado o lado que foi aberto com uma tampa produzida na impressora 3D, especificadamente para isso. Com isto feito, foi fixado o tubo em cima do mecanismo de balanço, com uma presilha de plástico preta.

A câmera foi posicionada na região de interesse, a iluminação ajustada, para poder visualizar com clareza o objeto de estudo e posteriormente ligar o mecanismo. Com o mecanismo ligado, primeiramente, coloca-se na velocidade mais baixa 53.05 rpm, depois aumenta para média 60.6 rpm e alta velocidade 68.2 rpm.

Com fim da filmagem, passa-se as imagens para o computador e começa os tratamentos das imagens.

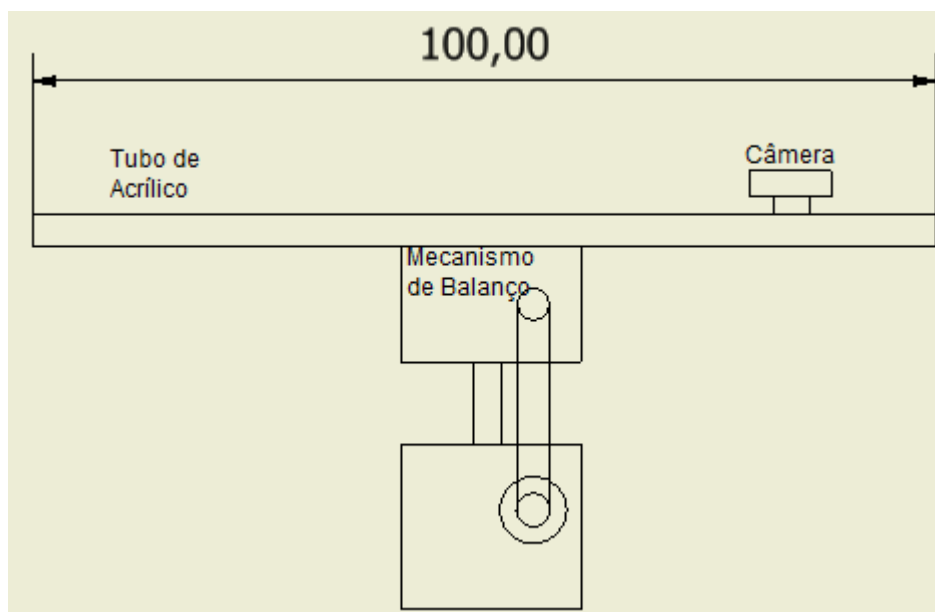
De forma resumida, os principais passos para realização das medidas experimentais são:

1. Colocar o líquido dentro do tubo;
2. Fixar o tubo no mecanismo de balanço;
3. Posicionar e ajustar os parâmetros de filmagem da câmera;
4. Ligar a câmera;
5. Ligar o mecanismo de balanço;
6. Regular a velocidade;
7. Transferir os dados da câmera para o computador;
8. Iniciar o processamento das imagens obtidas;

### 5.3 PROJETO

Projeto de esboço realizado em Autocad 2019 estudantil, para realização da bancada experimental da célula de balanço, em centímetros, se encontra na Figura 26 abaixo:

**Figura 26: Esboço da bancada experimental em centímetros**



**Fonte: Autoria própria.**

Bancada experimental da célula de balanço, que se encontra dentro do laboratório de vibrações na UTFPR – Guarapuava, está demonstrada na Figura 27 abaixo:

**Figura 27: Bancada real no laboratório da UTFPR-Guarapuava**

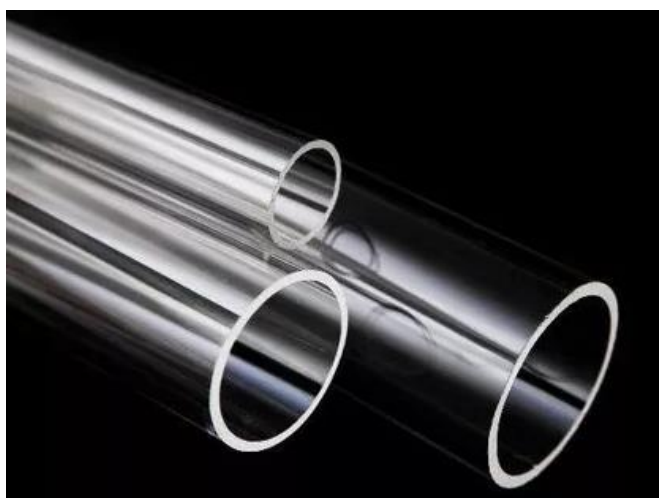


**Fonte: Autoria própria.**

Foram utilizado dois tubos de acrílico para os testes experimentais, um com tamanho de 25,5 milímetros de diâmetro externo, com 21 milímetros de diâmetro interno com 1 metro de comprimento e outro com 49,9 milímetros de diâmetro externo, 46,2 de diâmetro interno e 1 metro de comprimento. Foram feitas 3 medições, preenchido com, aproximadamente, 57,7%, 75% e 89,5% do volume total do tubo com água e outros 42,3%, 25% e 10,5%, respectivamente, com ar atmosférico, ou seja a pressão dentro do tubo será a atmosférica.

Também foi utilizado dois tubos de ensaio para a medição da água, que foi colocada dentro dos tubos principais, com 500 ml para o tubo de diâmetro maior e 150 ml para o tubo de diâmetro menor. Conforme mostrado nas figuras 28 e 29.

**Figura 28: Representação dos tubos de acrílico.**



**Figura 29: Tubos de ensaios de acrílico usados no trabalho.**



**Fonte: Autoria própria.**

Foi utilizado um refletor externo de LED de 100 W de potência, da marca TO-LED, atrás do tubo e voltada para frente da câmera, ou seja, onde foi realizado a filmagem. Foi colocado nesta posição, pois a luz quando é fixada para a lente da câmera permite enxergar detalhes em uma filmagem, que no caso seriam as silhuetas das bolhas. E foi adicionado no refletor um pedaço de papel manteiga para que a luz não chegasse diretamente na lente da câmera, diminuindo as sombras e conseguindo captar melhor a imagem, conforme mostrado na Figura 30.

**Figura 30: Refletor externo de LED.**



**Fonte: Autoria própria.**

A câmera utilizada no projeto, foi acoplada a suporte flexível de maneira que fixa-se ao tubo. Conforme Figura 31.

**Figura 31: Suporte flexível.**



**Fonte: Autoria própria.**

Foi utilizada uma câmera da marca GoPro Hero 3+, mostrada na Figura 32. No qual, proporciona uma captação de imagem estática de 10 megapixels, que possui alta resolução com 1280x720 pixels e filma em full HD com até 30 quadros por segundo, além, de contar com cartões de memória que podem ter até 64 GB de memória para o armazenamento de dados. Ela foi posicionada de modo que capture a faixa do escoamento onde acontece a formação de bolhas.

A partir das imagens tiradas foi possível fazer a análise qualitativa do escoamento utilizando o Autocad 2019 estudantil, e desse modo encontrar a velocidade da bolha e a fração de vazio. A câmera foi fixada nos pontos de formação das bolhas.

**Figura 32: Câmera utilizada para captação das imagens.**



O mecanismo de célula de balanço utilizado para a movimentação dos tubos, foi feito suas peças em um software de desenho assistido por computador (CAD), a fabricação das peças foi por meio de uma impressora 3D que se encontra dentro da própria UTFPR câmpus Guarapuava. Conforme mostrado na Figura 33.

**Figura 33: Mecanismo de balanço.**

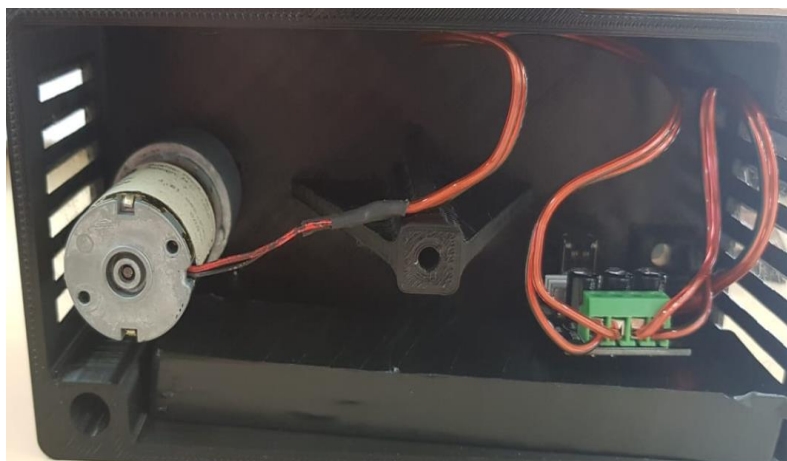


**Fonte: Autoria própria.**

Foi utilizado um motor de corrente contínua (c.c) que se encontra dentro do mecanismo de balanço, com um redutor para o controle de velocidade. o motor no caso com o peso do tubo com diâmetro menor em cima dele, consegue chegar a uma

velocidade máxima e mínima respectivamente de 68.2 rpm e 53.05 rpm. Conforme mostrado na Figura 34.

**Figura 34: Motor c.c acoplado dentro do mecanismo de balanço.**



*Fonte: Autoria própria.*

Foi utilizado para medir as velocidades de rotações por minuto do motor de corrente contínua com redutor, um tacômetro mostrado na Figura 35 abaixo.

**Figura 35: Tacômetro.**



*Fonte: Autoria própria.*



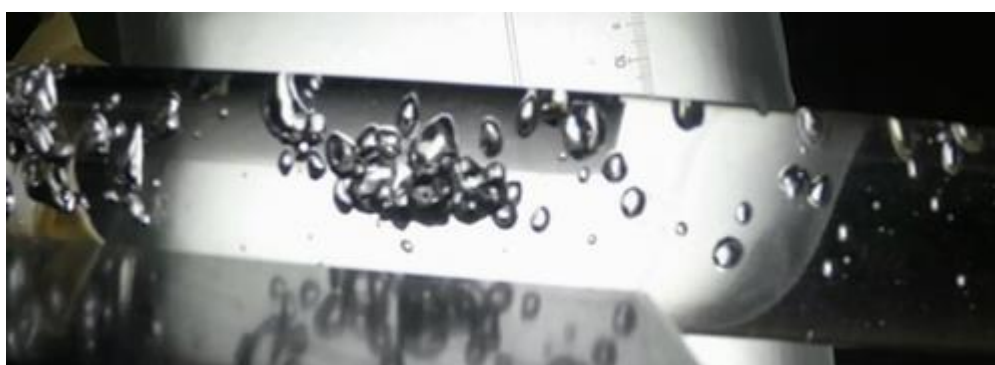
## 6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados as análises dos resultados obtidos pelos testes experimentais. Primeiro será mostrado o processamento das imagens obtidas pela câmera, em seguida o movimento cinemático das bolhas, grades de testes, posição do nariz da bolha e por fim será feita uma análise qualitativa do escoamento para que possa ser calculados a velocidade da bolha alongada, a fração de vazio e de líquido e a análise de erros.

### 6.1 PROCESSAMENTO DAS IMAGENS OBTIDAS PELA CÂMERA

O processamento das imagens foi feito através de um aplicativo da própria empresa da câmera, "GoPro Studio", cujo funcionamento consiste em melhorar a imagem, além de reduzir a velocidade da filmagem, auxiliando na visualização das posições referentes ao nariz de cada bolha e no cálculo de suas velocidades, frações de vazio e de líquido e sua quantidade de massa. Sem a utilização deste software, não seria possível obter a Figura 36 abaixo, que seria de uma imagem do tubo de 21 mm de diâmetro interno com 57,7% de volume de água em seu interior com a 3ª velocidade de 68.2 rpm, do mecanismo de balanço. A tabela 2, demonstra as velocidades em cada tubo com seu respectivos volumes.

**Figura 36: Imagem com o tratamento**



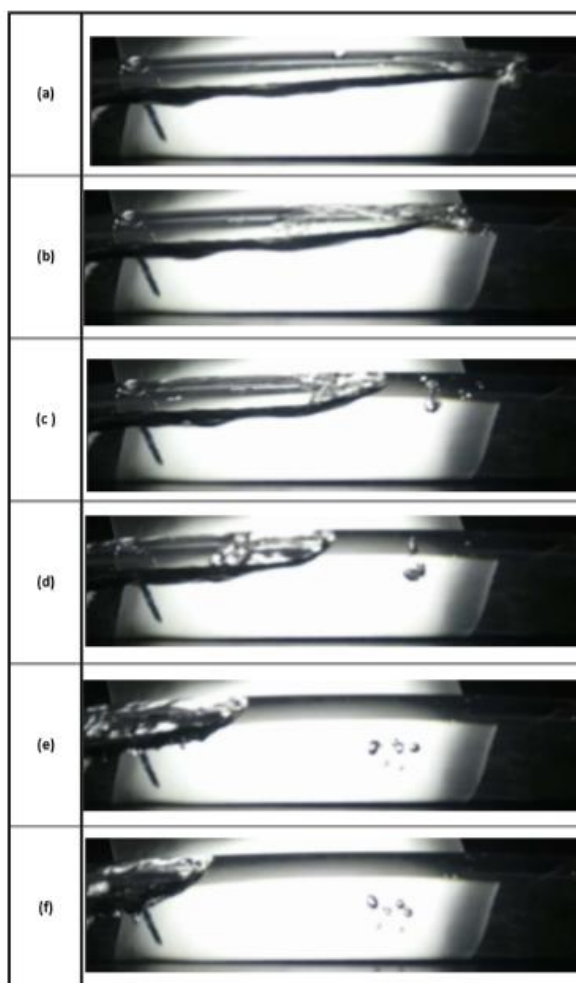
**Fonte: Autoria própria**

## 6.2 MOVIMENTO CINEMÁTICO DAS BOLHAS

As Bolhas, no caso do projeto bolhas de ar, se movimentam variando sua velocidade, direção e sentido. O vetor de velocidade sempre será tangente as linhas de correntes, fazendo com que as linhas nunca se cruzem e assim, elas se aproximam uma das outras. Por isso que em tubos com menores diâmetros internos comparados com tubos com maiores diâmetros internos apresentam maiores velocidades de escoamento.

No caso da Figura 37, foi usado um tubo 21 mm de diâmetro interno com velocidade de 68.2 rpm com 89,5% de volume de água, onde o fluido se movimenta da direita para esquerda, foi visto a movimentação cinemática das bolhas, pois as paredes do tubo definem as mesmas.

**Figura 37: Movimento cinemático das bolhas**



**Fonte: Autoria própria.**

### 6.3 GRADES DE TESTES

As grades de testes, foram feitas para mostrar quais são os critérios que foram utilizado para realização dos cálculos, e além disso será mostrado abaixo uma comparação de imagens entre os dois tubos utilizado neste trabalho, ou seja com diâmetros diferentes, com volumes diferentes, só que, ocupando o mesmo espaço em porcentagem de seu respectivo tubo e com velocidades iguais.

**Tabela 2: Grade de testes.**

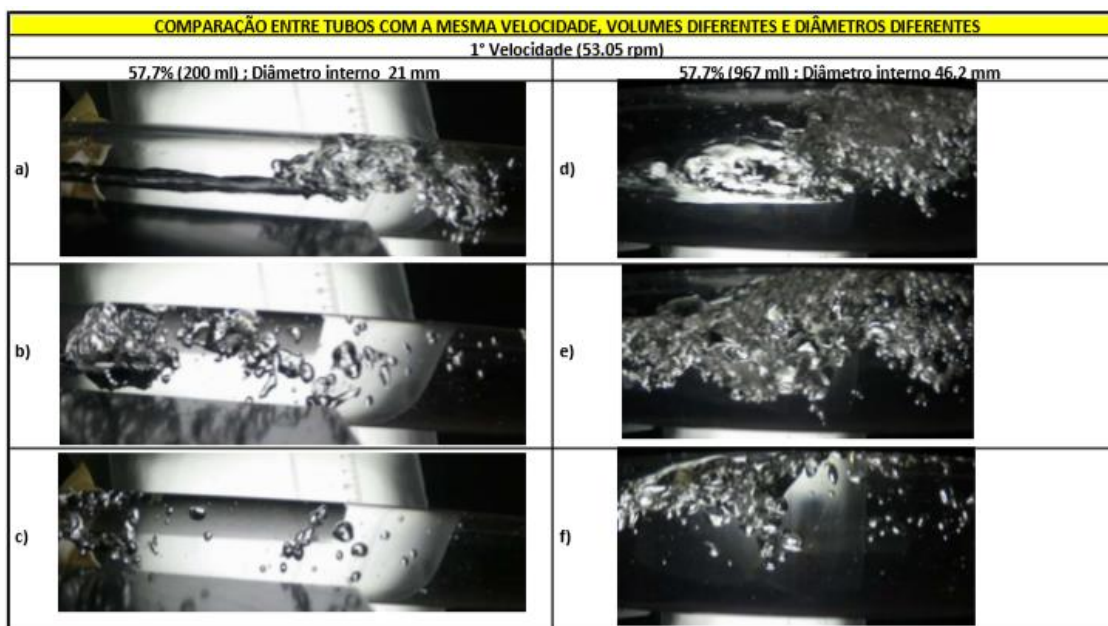
GRADE DE TESTES		GRADE DE TESTES	
TUBO DE 21 mm DE DIÂMETRO INTERNO (volume total 346,36 ml)		TUBO DE 46,2 mm DE DIÂMETRO INTERNO (volume total 1676 ml)	
Velocidade (rpm)	Volume de água dentro do tubo (%)	Velocidade (rpm)	Volume de água dentro do tubo (%)
1° (53.05 rpm)	57,7 % (200ml)	1° (53.05 rpm)	57,7% (967ml)
	75 % (260ml)		76 % (1275ml)
	89,5 % (310ml)		89,4 % (1500ml)
2° (60.6 rpm)	57,7 % (200ml)	2° (60.6 rpm)	57,7% (967ml)
	75 % (260ml)		76 % (1275ml)
	89,5 % (310ml)		89,4 % (1500ml)
3° (68.2 rpm)	57,7 % (200ml)	3° (68.2 rpm)	57,7% (967ml)
	75 % (260ml)		76 % (1275ml)
	89,5 % (310ml)		89,4 % (1500ml)

*Fonte: Autoria própria.*

Nas figuras de 38 a 46, pode-se ter uma comparação visual, entre um tubo com 21 mm de diâmetro interno e outro com 46,2 mm de diâmetro interno, foi repetido o experimento três vezes e comparado três imagens tiradas em intervalos de tempo parecidos, com velocidades e porcentagem de volume iguais.

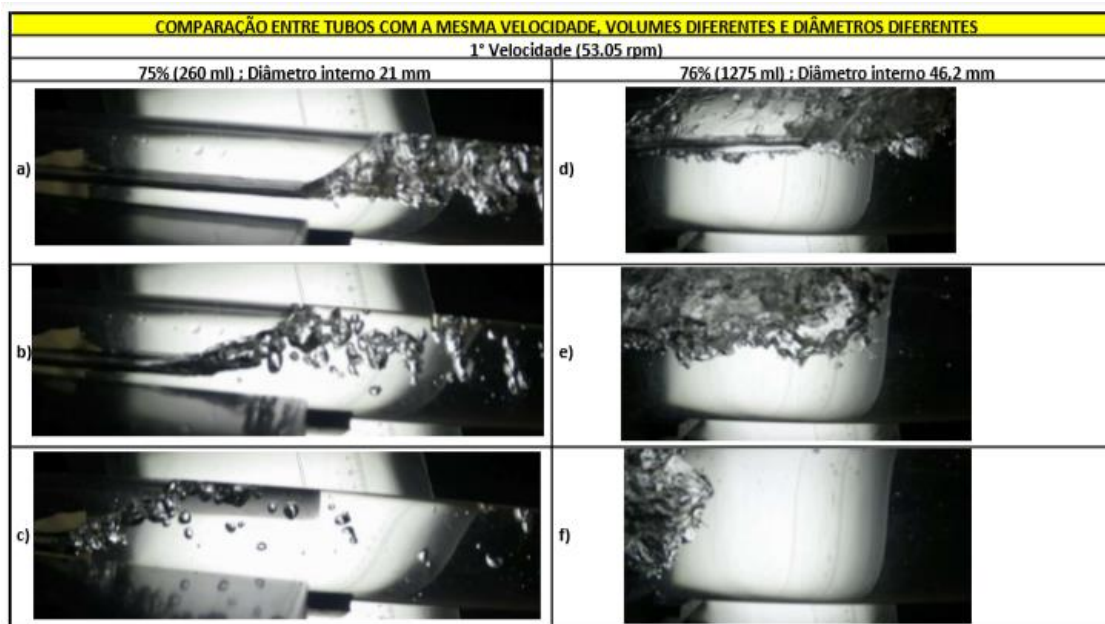
Nas figuras 38, 39 e 40, pode-se notar que nas imagens (a, b, c) do tubo com diâmetro menor, na 1° velocidade (53.05 rpm), apresentam visualmente ter menos aeração, ou seja, com menos ar no momento da formação das bolhas, do que nas imagens do tubo de maior diâmetro interno, porque nos tubos com maiores diâmetros se tem bolhas maiores, pelo espaço maior, e assim dificultando a visualização das bolhas alongadas. Pode-se ver que as imagens da direita (d, e, f) estão mais dispersas do que as imagens, (a, b, c), pois o espaço, comparada com as imagens da esquerda é maior, fazendo com que haja mais dispersões. Com isso, fica mais difícil encontrar visualmente o nariz da bolha de uma bolha alongada, isso será explicado a fundo no próximo tópico.

Figura 38: Comparação entre tubos 1.



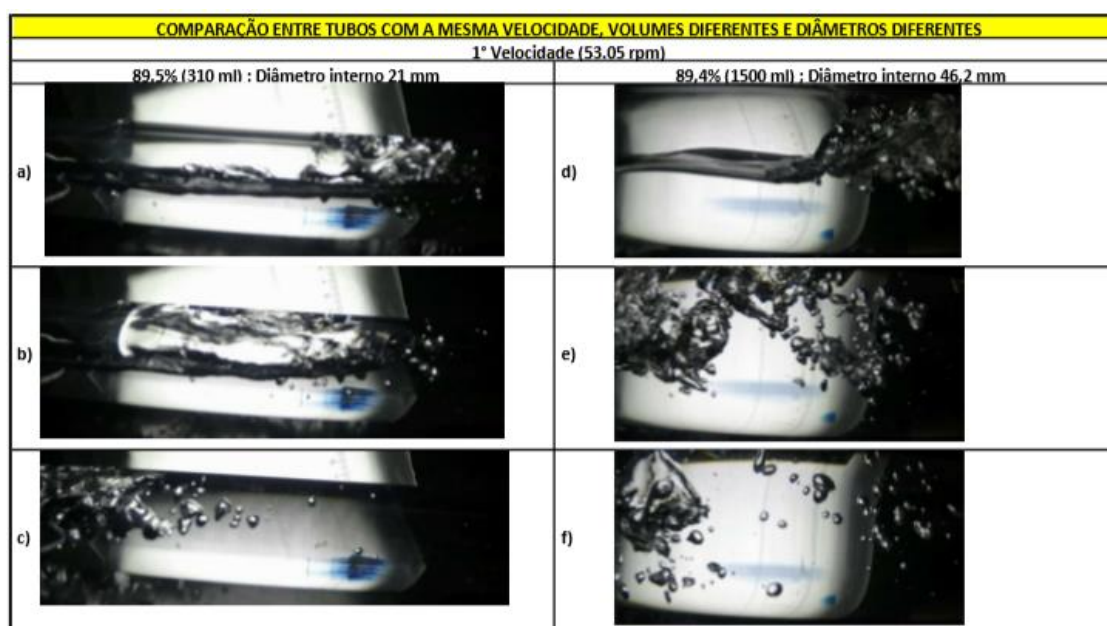
Fonte: Autoria própria.

Figura 39: Comparação entre tubos 2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 40: Comparação entre tubos 3.

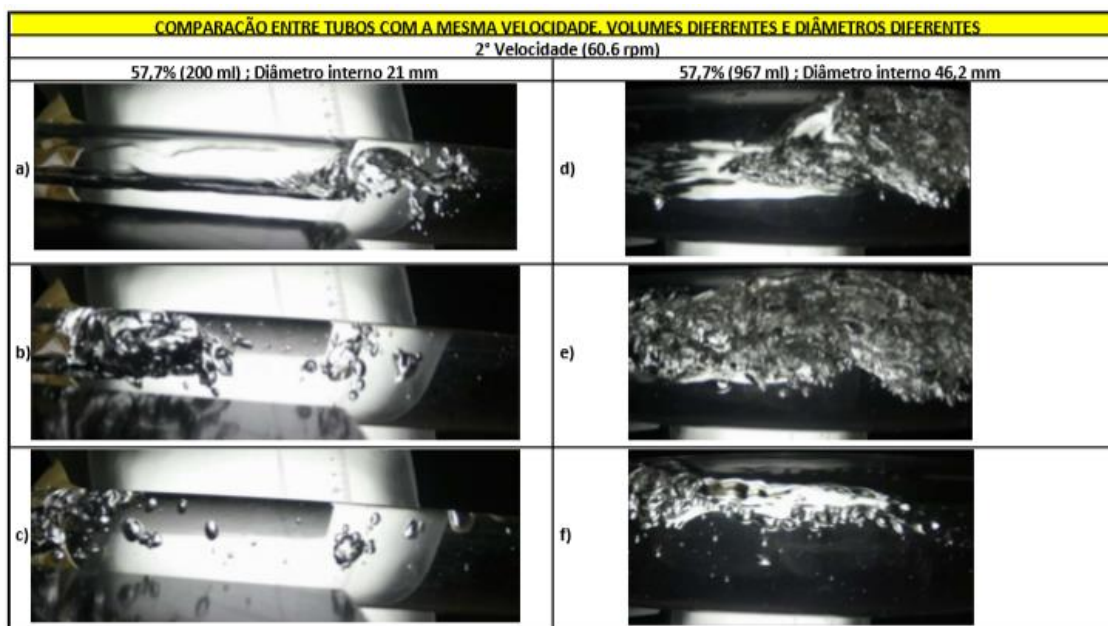


Fonte: Autoria própria.

Analisando na 2ª velocidade (60.6 rpm), pode-se reparar que com o aumento da velocidade houve um aumento da perturbação no ambiente, ou seja, podemos ver, principalmente nas imagens do tubo de maior de diâmetro interno que há um aumento significativo de ar, como visto na Figura 41 do lado direito (d, e, f) por exemplo, dando um ambiente com maior aeração comparado com o caso de menor velocidade acima. Mas mesmo assim pode notar, na Figura 43 (a, b, c), por exemplo, o aparecimento bem nítido de uma bolha alongada no tubo de menor diâmetro, esta mesma imagem será usada ao decorrer do trabalho para encontrar o nariz da bolha e assim fazer o cálculo da velocidade e sua fração de vazio.

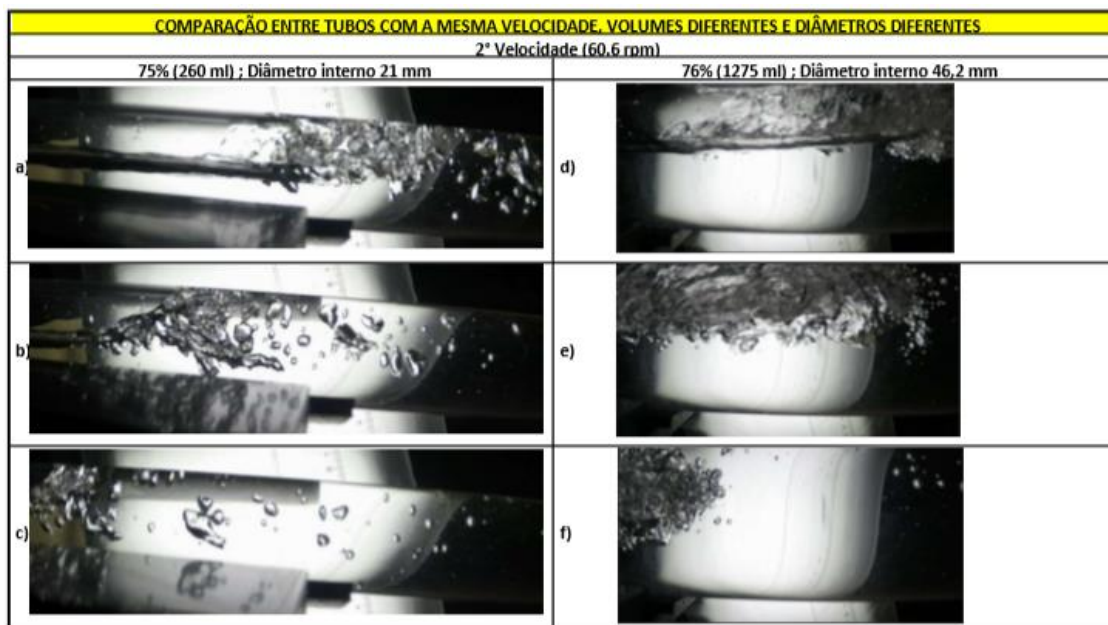


Figura 41: Comparação entre tubos 4.



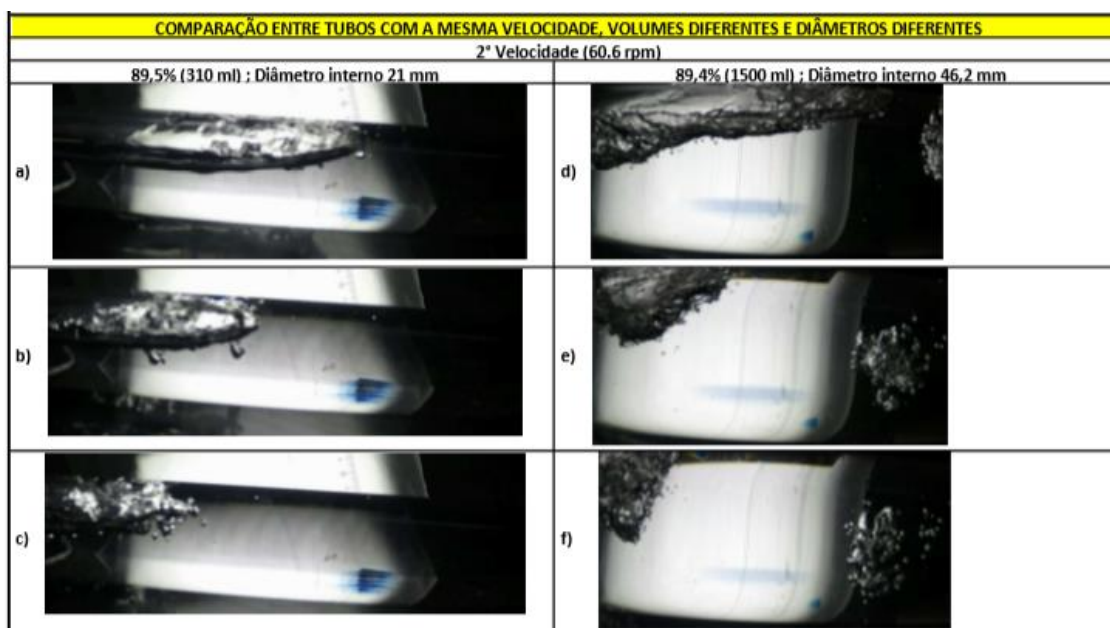
Fonte: Autoria própria.

Figura 42: Comparação entre tubos 5.



Fonte: Autoria própria.

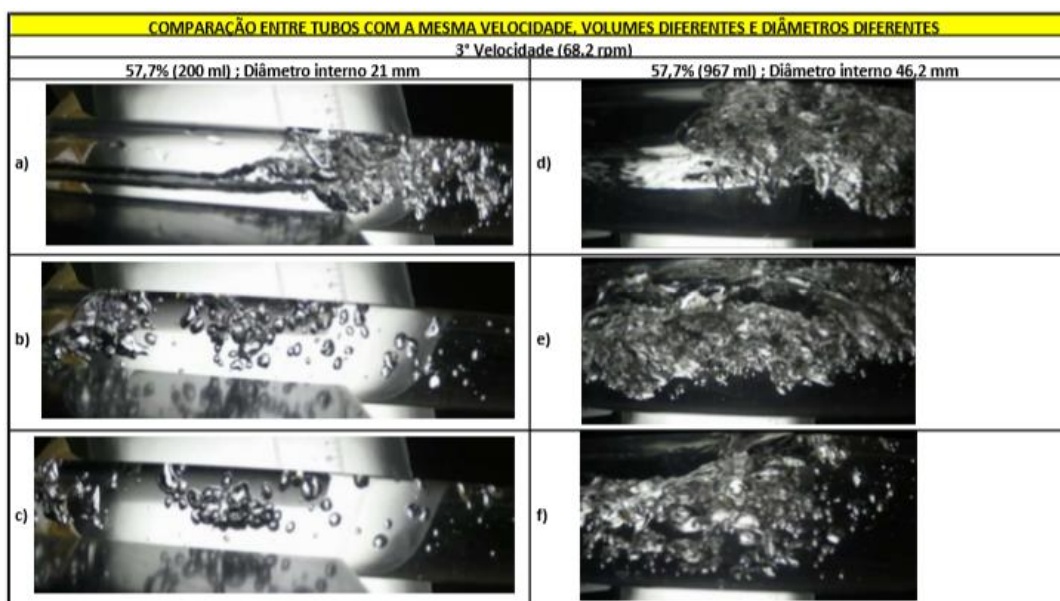
Figura 43: Comparação entre tubos 6.



Fonte: Autoria própria.

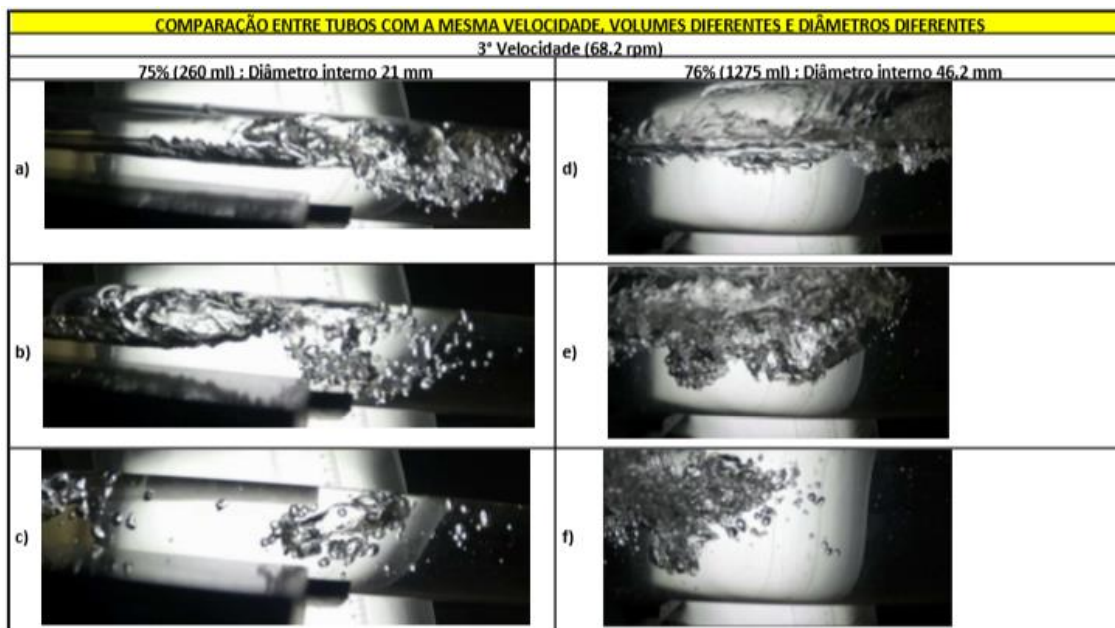
Nas figuras 44, 45 e 46, são mostrados uma comparação na velocidade 68.2 rpm que o mecanismo de balanço consegue movimentar o tubo, no caso seria a 3ª velocidade, pode-se notar que aumentou ainda mais a área de aeração dentro do tubo, pois com o aumento da velocidade, tem uma maior movimentação da água, criando assim maiores turbulências de ar dentro do tubo.

Figura 44: Comparação entre tubos 7.



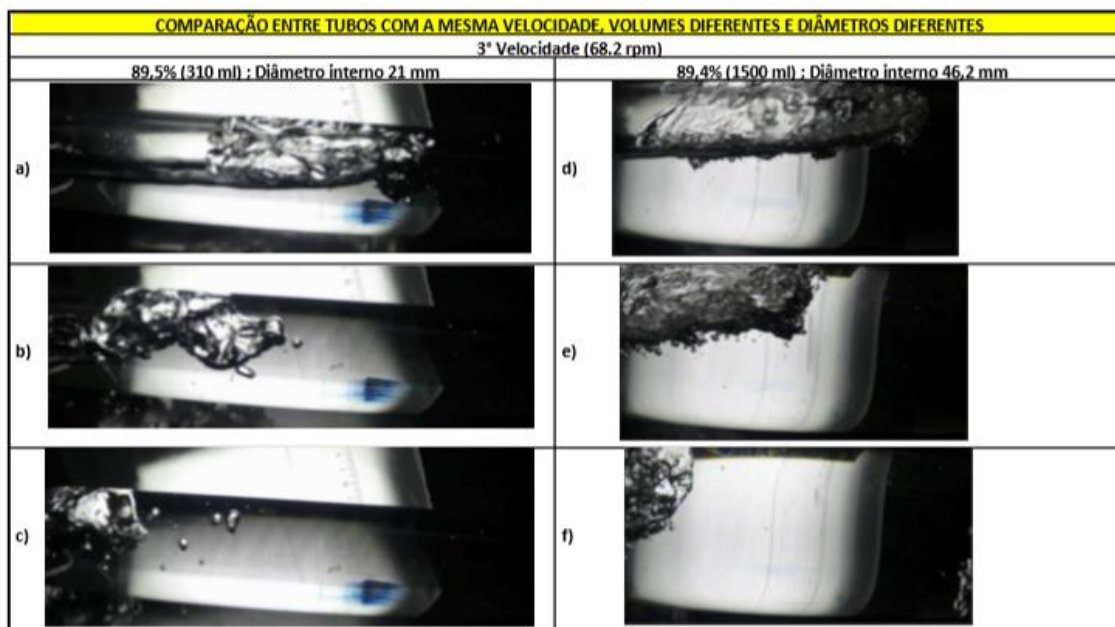
Fonte: Autoria própria.

Figura 45: Comparação entre tubos 8.



Fonte: Autoria própria.

Figura 46: Comparação entre tubos 9.



Fonte: Autoria própria.

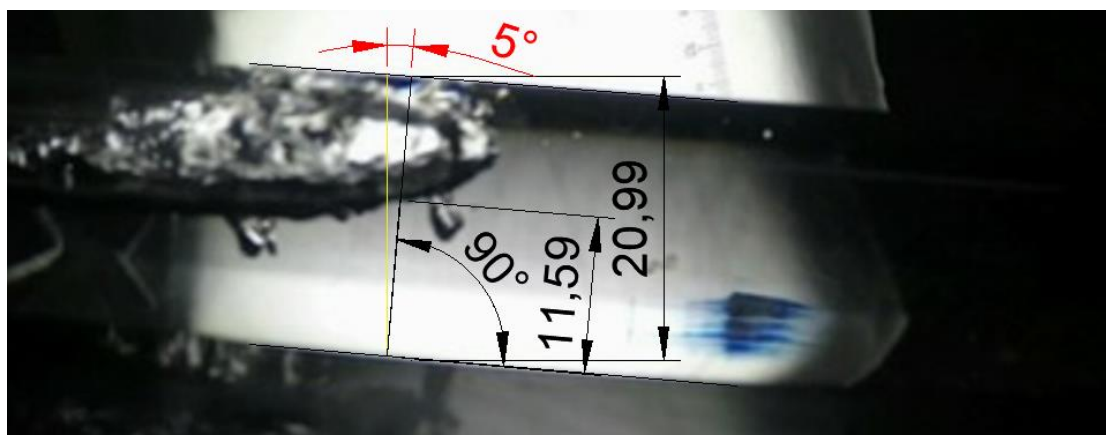


#### 6.4 POSIÇÃO DO NARIZ DAS BOLHAS ALONGADAS

A imagem utilizada para aquisição da bolha alongada e seu nariz, está representada na Figura 47 abaixo, foi feita a partir do tubo com 21 mm de diâmetro com 89,9 % (310 ml) de volume de água com a 2ª velocidade (60.6 rpm). Nela foi feito um tratamento de imagem no GoPro studio, para deixar a imagem mais nítida, com uma qualidade melhor, além de usar o Autocad 2019 estudantil para colocar uma linha perpendicular ao tubo, que demonstra o tamanho do tubo e serve como referência no decorrer em que a bolha passa pelo mesmo. Como deu valor diferente que 21 mm, pode-se ver que há imperfeições no interior dos tubos assim, será feito uma análise de erros no apêndice A.

Também, é visto o ângulo que o tubo estava era de 5°, em relação a vertical. No laboratório de vibrações da universidade, foi usado um transferidor para medição deste ângulo que também deu um valor de 5° em relação a vertical.

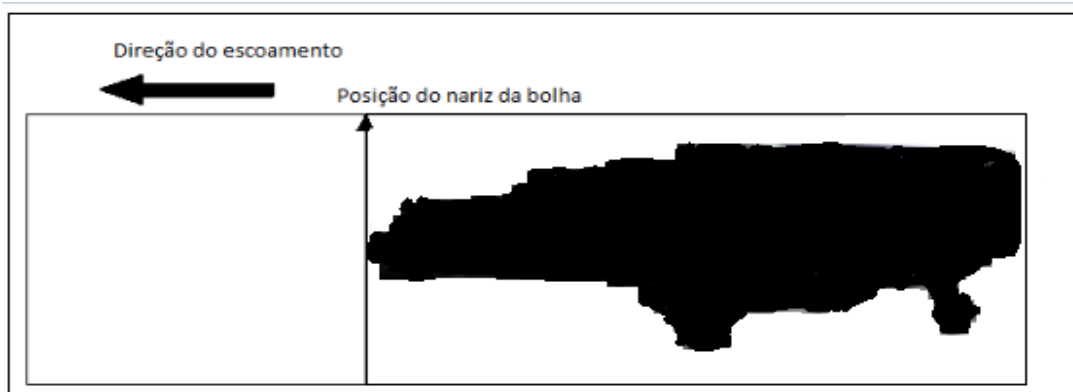
**Figura 47: Bolha alongada que será estuda**



**Fonte: Autoria própria**

Com o tratamento de imagem finalizado, é necessário verificar visualmente se há a presença de uma bolha alongada, caso exista, a imagem é retirada do vídeo e encontra a posição do nariz da bolha. A direção do escoamento de água, se dá da direita para esquerda. Um esquema desse procedimento pode ser observado na Figura 48 abaixo.

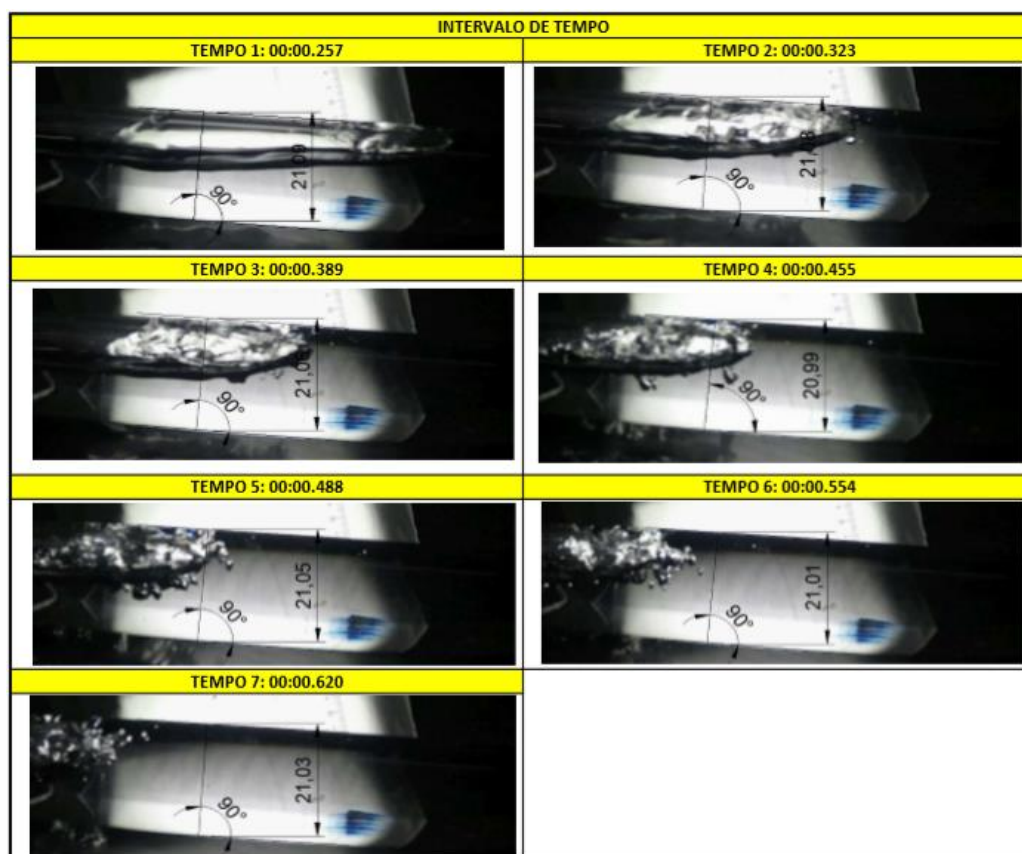
**Figura 48: Posição do nariz da bolha**



**Fonte: Autoria própria**

Foi feito um acompanhamento desta bolha, da Figura 47, para saber a diferença da posição em que está o nariz da bolha quando ela entra (Tempo 1, 00:00.257) e quando ela sai (Tempo 5, 00:00.488) do campo de visão da câmera em pixels, tendo uma variação de tempo de 231 milésimos de segundos. Isto será mostrado pela Figura 49.

**Figura 49: Intervalo de tempo de aparecimento da bolha.**



**Fonte: Autoria própria**

Esse processo pode ser repetido para todas as bolhas do escoamento, fornecendo a posição do seu nariz em cada imagem onde ele aparece.

## 6.5 VELOCIDADE DA BOLHA ALONGADA

Para se calcular a velocidade da bolha alongada basta saber quais as posições e quais são as imagens onde se encontra o nariz de cada bolha alongada, o valor da velocidade é calculada pela fórmula abaixo:

$$V_B = \frac{\Delta X_p}{\Delta Img} (T_p)(F_R) \quad (18)$$

Onde:

- $\Delta X_p$  é a diferença da posição em que está o nariz da bolha quando ela entra e quando ela sai do campo de visão da câmera em pixels.
- $\Delta Img$  número de imagens em que o nariz da bolha permanece no campo de visão da câmera, unidade de medida em imagens.
- $T_p$  é o tamanho de cada pixel em m/pixel.
- $F_R$  é a taxa de aquisição de imagens em imagens/s.

## 6.6 REALIZANDO OS CÁLCULOS

Neste tópico serão calculados, primeiramente, a velocidade da bolha alongada, depois a fração de vazio no pistão de líquido na bolha alongada calculado.

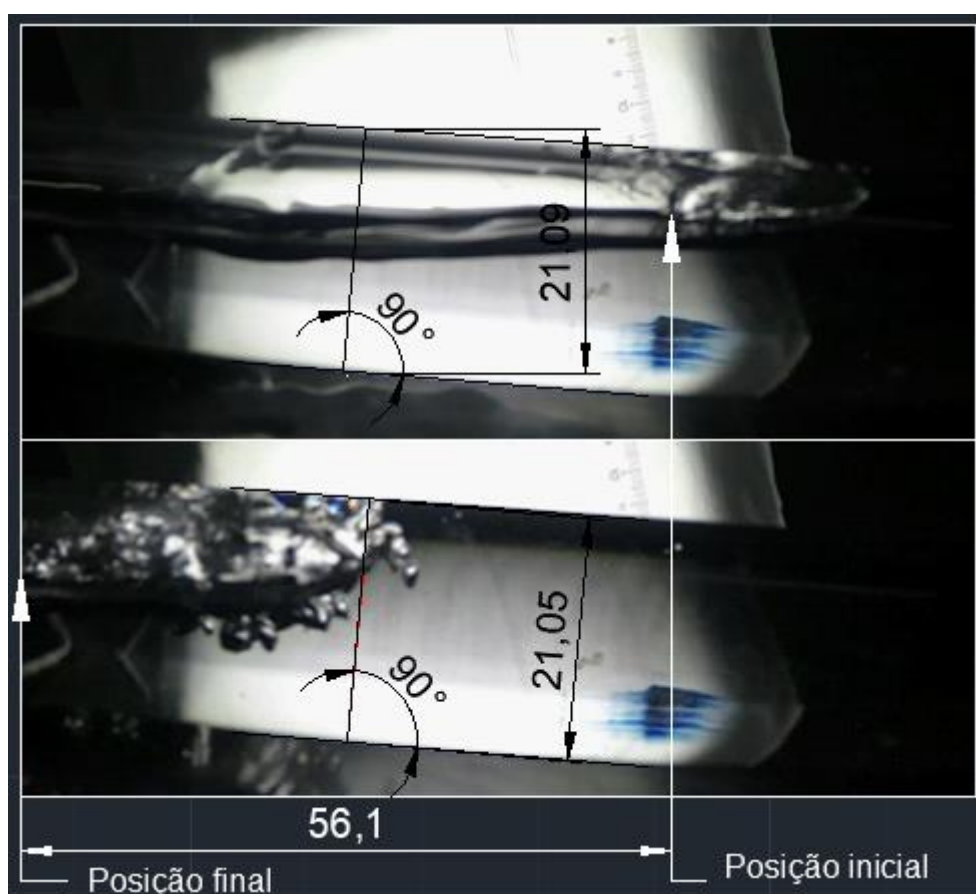
### 6.6.1 CÁLCULO DA VELOCIDADE DA BOLHA

Para o cálculo da velocidade da bolha foi usado a fórmula citada no tópico 6.5, a fórmula citada no tópico 3.13, são para estudos de grandes bolhas formadas, quando o líquido é esvaziado de um tubo horizontal.

É necessário encontrar a diferença da posição em que está o nariz da bolha

quando ela entra e sai do campo de visão da câmera em pixels ( $\Delta X_p$ ) demonstrados, respectivamente, pelo Tempo 1 e Tempo 5 da Figura 49. Foi colocado essas duas imagens uma em cima da outra, mostrada na Figura 50, e no meio foi medido, utilizando a cota do Autocad 2019 estudantil, a variação da distância da posição inicial para a posição final do nariz da bolha, encontrando um valor de 56,1 mm ou 2,208661 polegadas. Como uma polegada são 96 pixels, portanto tem-se 211,97434 Pixels.

**Figura 50: Representação da posição inicial e final do nariz da bolha.**



**Fonte: Autoria própria**

São 5 imagens em que o nariz da bolha permanece no campo de visão da câmera ( $\Delta \text{Img}$ ), mostradas do Tempo 1 ao Tempo 5 na Figura 49. Como 1 polegada em metros seria igual a 0,0254 m e a câmera utilizada filma a uma resolução de 720 pixels, o tamanho de cada pixel em m/pixel ( $T_p$ ):

$$T_P = \left( \frac{Pol}{Pixel} \right) \frac{m}{pixel} \quad (19)$$

$$T_P = \left( \frac{0,0254}{720} \right) = 3,257 \times 10^{-5} \frac{m}{pixel}$$

E por fim, é necessário encontrar a taxa de aquisição de imagens ( $F_R$ ), como foi filmado em 30 fps (frames por segundo) o valor de  $F_R = 30 \frac{imagens}{s}$ . Os dados retirados da bolha alongada mostrada na Figura 50, são:  $\Delta X_p = 211,97434$  pixels,  $\Delta Img = 5$  imagens,  $T_P = 3,257 \times 10^{-5}$  m/pixel,  $F_R = 30$  imagens/s, utilizando a equação (18), podemos afirmar que:  $V_B = \left( \frac{211,97434}{5} \right) * (3,257 \times 10^{-5}) * (30) = 0,04142$  m/s

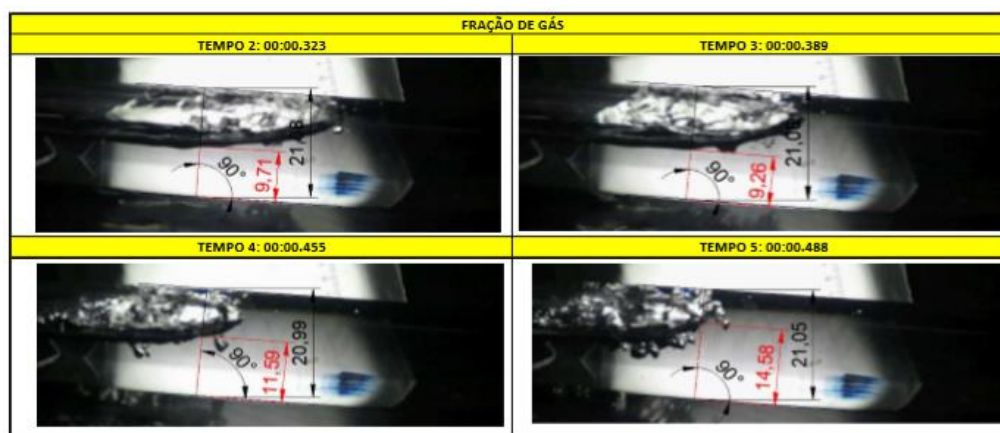
Portanto a velocidade aproximada da bolha alongada é 0,04142 m/s.

### 6.6.2 CÁLCULO DA FRAÇÃO DE VAZIO

Shoham (2006), diz que a fração de vazio de gás é a fração do elemento que é ocupado pela fase de gás e  $R_G < 1$  para escoamentos de duas fases. Portanto a fração de vazio seria a área de seção transversal e um volume finito, pela parede do tubo com dois planos verticais imaginários, levando em conta que estão em função do tempo.

A Figura 51, demonstra o tamanho da fração de vazio em cada tempo passado na linha de referência, feito em Autocad 2019 estudantil. Como pode ser visto, há valores de diâmetros diferentes, mesmo sendo imagens do mesmo tubo em tempos diferentes, devido a inclinação do tubo e por isso será feito uma análise de erros no apêndice A.

**Figura 51: Fração de vazio da passagem da bolha.**



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3, é explicado a porcentagem de líquido (água) e gás (ar) em relação ao tempo e ao diâmetro do tubo, conforme a bolha alongada, passa pela linha de referência apresentada na Figura 51.

**Tabela 3: Porcentagem de água e ar dentro do tubo.**

PORCENTAGEM DE ÁGUA E GÁS/AR DENTRO DO TUBO			
TEMPO	DIÂMETRO DO TUBO	% DE ÁGUA	% DE GÁS/AR
2 (00:00.323)	21,08 mm	46,06%	53,94%
3 (00:00.389)	21,06 mm	43,96%	56,04%
4 (00:00.455)	20,99 mm	55,21%	44,79%
5 (00:00.488)	21,05 mm	69,26%	30,74%

Fonte: Autoria própria

## 7 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido uma análise experimental da hidrodinâmica do escoamento bifásico em uma célula de balanço, no qual, um tubo foi movimentado mudando sua direção levemente em inclinação descendente. Os fluidos testados foram ar e água e a inclinação usada nestas regiões descendentes foi de 5° em relação a vertical.

Uma câmera de alta resolução foi instalada para aquisição de imagens, na região do ponto de medição. Foram feitas 3 repetições do experimento, e foi comparado visualmente, o tubo de 21 mm de diâmetro interno e o tubo de 46,2 mm de diâmetro interno, variando-os em 3 velocidades (53.05 rpm, 60.6 rpm e 68.2 rpm) e volumes diferentes mostrados na Tabela 2.

O tubo com 21 mm de diâmetro interno com 89,9 % (310 ml) de volume de água com a 2° velocidade (60.6 rpm), tem imagens mais próximas visualmente com as encontradas no método de golfadas, por conta de o tubo ter um menor espaço, diminuindo a dispersão das bolhas. A maioria das imagens obtidas pelo tubo de 46,2 mm de diâmetro interno não foi possível visualmente, enxergar um tipo específico de padrão de escoamento.

Com o tratamento de imagem já realizado, foram feitas linhas perpendiculares, utilizando o programa Autocad 2019 versão estudantil, em uma seção do tubo para servir de referência de uma imagem a outra, além de utilizar a cota do próprio programa para encontrar o comprimento do diâmetro e distância da posição inicial e final do nariz da bolha, conseguindo assim extrair parâmetros tais como a velocidade da bolha de 0.04142 m/s e sua fração de vazio.

E por fim, foi realizado uma análise de erro, pois, mesmo que as especificações do tubo utilizado fosse de diâmetro igual a 21 mm, quando usado a cota do Autocad 2019 estudantil, não era encontrado esse valor precisamente, notando assim que havia alguma incerteza de medição, seja ela erro humano ou do próprio software.

Portanto, nos dois tubos utilizados no trabalho, o tubo de maior diâmetro interno com 46,2 mm, não apresentou o resultados esperado, que seria visualização de uma bolha alongada, isso porque não havia recursos, para a utilização dos sensores de

passagem de fase, que provavelmente iriam detectar tal bolha. Além disso, no tubo de menor diâmetro pode se ter resultados significativos, tanto visualmente, observando precisamente uma bolha alongada com a localização do seu nariz da bolha e matematicamente encontrando sua velocidade e fração de vazio.

Em função dos resultados obtidos no presente trabalho sugere-se os seguintes estudos:

1. Utilizar um motor de corrente contínua, ou outro, com maior potência.
2. Analisar os efeitos em tubos com diferentes fluídos e diâmetros.
3. Utilizar duas câmeras uma no ponto de mudança de direção e outra no ponto de medição.
4. Utilizar sensores de passagem de fase nas estações de medição, para melhorar na precisão dos resultados.
5. Analisar o efeito causado para as inclinações menores e maiores que  $5^\circ$  em relação a vertical.
6. Comparar os resultados com trabalhos similares, porém com validações em softwares matemáticos, por exemplo o ANSYS ou Matlab.



## REFERÊNCIAS

ALVES, R.F. Estudo experimental do escoamento bifásico líquido gás em golfadas com leve mudança de direção. Dissertação de Mestrado, Curitiba.2015.

BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 10, p. 467-483, 1984

Benjamin, T.B.: "Gravity Currents and Related Phenomena", J. Fluid. Mech., 31, part 2, pp. 209-248 (1968)

CALLISTER Jr., W.D., Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução, 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

CHANDRAGUPHTAN, B., An Insight to Inhibitors. PETROMIN. Disponível em: , (2011)

CONTE M. G. Estudo numérico e experimental da geração de golfadas em um escoamento bifásico de gás-líquido. Curitiba. 2014.

COUTINHO, A. M. F, SUNAGA, G. Y, GOTZ, J. D. Aplicação de sensores de impedância para determinação de vazão em escoamento bifásico. Dissertação de Trabalho de Conclusão de Curso. Curitiba 2017.

DA SILVA, M. J. Impedance Sensors for Fast Multiphase Flow Measurement and Imaging. Dresden: Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, 170p. Tese de Doutorado, Technische Universität Dresden, 2008.

DUKLER, A. E.; HUBBARD, M. G. A model for gas-liquid slug flow in horizontal and near horizontal tubes. Ind. Eng. Chem., Fundam., Vol 14, p. 337, 1975

FERNANDEZ, E. JUNIOR, F. O. A. P. PINHO, A.C. Dicionário do Petróleo. Disponível em: <http://dicionariodopetroleo.com.br/dictionary/escoamento-multifasico/>. Acessado em 27 de outubro de 2018.

FERRARO G. N. Os fundamentos da física. Disponível em: <http://osfundamentosdafisica.blogspot.com/search?q=diagrama+de+fase&btnG=Pesquisar>. Acessado em 31/05/2019

GUITERAS, O. H. J. Metodologia de análise global para o desenvolvimento de um campo de gás natural. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro 2003.

HEYWOOD, N.; RICHARDSON, J. F. Slug flow of air-water mixtures in a horizontal pipe: Determination of liquid holdup by  $\gamma$  - ray absorption. *Chemical Engineering Science*, Vol. 34, No. 1, pp.17-30, 1979.

JUNIOR, Francisco Ramalho. *Os fundamentos da Física*. Vol. 2. 9.ed. rev. e ampl. São Paulo: Moderna, 2007.

LIBERT, N. Sistema de medição capacitivo para determinação da fração de vazio em escoamentos bifásicos. 2013. 115 f. Dissertação de Mestrado- Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

MOISSIS, R; GRIFFITH, P. Entrance Effects in a two-phase slug flow. *Journal of Heat Transfer*, Vol. 84, No. 1, pp. 29-38, 1962.

NICHOLSON, K.; AZIZ, K.; GREGORY, G. A. Intermittent two-phase flow in horizontal pipes: predictive models. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 56, No. 6, pp. 653-663, 1978.

NICKLIN, D. J.; WILKES, M. A.; DAVIDSON, J. F. Two-phase flow in vertical tubes. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 40, pp. 61-68, 1962.

PESSANHA V.G. ESTUDO DE VIBRAÇÃO INDUZIDA POR ESCOAMENTO INTERNO EM UM SISTEMA PIPELINE-RISER. Rio de Janeiro 2014.

REIS, R. F. Desenvolvimento de um modelo computacional para previsão de deposição de parafina em tubulações de transporte de petróleo. Dissertação de Trabalho de Conclusão de Curso, Guarapuava 2015.

SANTOS, E. N. dos. Técnicas para extração de parâmetros de escoamentos bifásicos em regime intermitente utilizando o sensor Wire-Mesh. 2011. 120 f. Dissertação de Mestrado– Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, p. 75-82, 2011.

SANTOS, G. J. dos. Sensor Capacitivo Inteligente para Monitoramento de Escoamentos Bifásicos, p. 14-34, 2014.

SHOHAM, Ovadia. *Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes*. 1ª ed. Texas-USA: Society of Petroleum Engineers, 2006.

SLOAN, E.D. Introductory overview: Hydrate knowledge development. *American Mineralogist*, Vol. 89, pp. 1155-1161, Colorado, 2004.

SLOAN, E.D.; KOH, C.A. *Clathrate Hydrates of Natural Gases*. 3ª Edição, Flórida, E.U.A.: Editora CRC Press, 2007.

STRAUME, E. O., KAKITANI, C., MERINO-GARCIA, D., MORALES, R. E., SUM, A. K., 2016. "Experimental study of the formation and deposition of gas hydrates in non-

emulsifying oil and condensate systems”. Chemical Engineering Science, Vol. 155, p. 111–126.

PASCCHOA, C. Subsea Flow Assurance and Pipeline Pigging. Disponível em: <https://www.marinetechologynews.com/blogs/subsea-flow-assurance-and-pipeline-pigging-700385>. Acessado em 27 de outubro de 2018.

TABACNIKS, M. H. Conceitos Básicos da Teoria de Erros, Universidade de São Paulo, Instituto de Física, 2009.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. Two-phase slug flow. Advances in Heat Transfer, Vol. 20, pp. 83-132, 1990.

TORRES, Carlos Magno A. Física – Ciência e Tecnologia. Vol 2. 2.ed. São Paulo: Moderna, 2010.

THOMAS, J. E. (Org.). Fundamentos de engenharia de petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro: Petrobras: Interciência, 2004.

WALLIS, G. B. One dimensional-two-phase flow. New York: McGraw-Hil, 1969

WEBER, M. E. Drift in intermittent two-phase flow in horizontal pipes. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Wiley Online Library, Vol. 59, No. 3, p. 398–399, 1981.

## APÊNDICE A - ANÁLISE DE ERROS

Tabacniks (2009), diz que, o processo de medida, assim como o instrumento utilizado, tem limites de precisão e exatidão, ou seja, toda medida realizada tem uma incerteza do valor medido. Em alguns aparelhos, a incerteza do instrumento já vem marcada, se não, a metade da menor divisão da escala é um bom começo.

O intervalo de confiança é indicado pelo símbolo “±”, e pode ser calculado a partir de medidas que variam de amostra para amostra. A incerteza de medida é calculada pela fórmula 20 citada abaixo, com  $M_{Max}$  sendo a medida máxima do intervalo de medição e  $M_{Min}$  a medida mínima.

$$Incerteza = \delta = \left( \frac{\text{Intervalo de confiança}}{2} \right) = \frac{(M_{Max} - M_{Min})}{2} \quad (20)$$

A representação da medida ( $m'$ ) é um intervalo e não um número, e será representada pela fórmula 21 abaixo:

$$m' = \left( \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2} \right) \pm \delta \quad (21)$$

No trabalho foi utilizado a cota do Autocad 2019 estudantil, para os cálculos da velocidade da bolha e fração de vazio, mostrados em tópicos anteriores. Na Figura 50, é visto que mesmo o tubo sendo o mesmo para todos os intervalos de tempo, com 21 mm de diâmetro, a cota deu valores diferentes, isso mostra que teria algum erro de medição feita no software, seja ela erro humano ou do próprio programa. Logo após será calculado a incerteza de medição das velocidades de rotação do motor de corrente contínua.

Será calculado a incerteza e representação de medida de todos os 7 tempos mostrado na Figura 50, utilizando as equações 20 e 21 respectivamente.

No Tempo 1 (00:00.257)

$$\delta = \frac{(M_{Max} - M_{Min})}{2} = \frac{(21,09 - 21)}{2} = 0,045$$

$$m' = \left( \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2} \right) \pm \delta = \left( \frac{21,09 + 21}{2} \right) \pm \delta = 21,045 \pm 0,045 \text{ mm}$$

No Tempo 2 (00:00.323):

$$\delta = \frac{(M_{Max} - M_{Min})}{2} = \frac{(21,08 - 21)}{2} = 0,04$$

$$m' = \left( \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2} \right) \pm \delta = \left( \frac{21,08 + 21}{2} \right) \pm \delta = 21,04 \pm 0,04 \text{ mm}$$

No Tempo 3 (00:00.389):

$$\delta = \frac{(M_{Max} - M_{Min})}{2} = \frac{(21,06 - 21)}{2} = 0,03$$

$$m' = \left( \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2} \right) \pm \delta = \left( \frac{21,06 + 21}{2} \right) \pm \delta = 21,03 \pm 0,03 \text{ mm}$$

No Tempo 4 (00:00.455):

$$\delta = \frac{(M_{Max} - M_{Min})}{2} = \frac{(21 - 20,99)}{2} = 0,005$$

$$m' = \left( \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2} \right) \pm \delta = \left( \frac{21 + 20,99}{2} \right) \pm \delta = 20,995 \pm 0,005 \text{ mm}$$

No Tempo 5 (00:00.488):

$$\delta = \frac{(M_{Max} - M_{Min})}{2} = \frac{(21,05 - 21)}{2} = 0,025$$

$$m' = \left( \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2} \right) \pm \delta = \left( \frac{21,05 + 21}{2} \right) \pm \delta = 21,025 \pm 0,025 \text{ mm}$$

No Tempo 6 (00:00.554):

$$\delta = \frac{(M_{Max} - M_{Min})}{2} = \frac{(21,01 - 21)}{2} = 0,005$$

$$m' = \left( \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2} \right) \pm \delta = \left( \frac{21,01 + 21}{2} \right) \pm \delta = 21,005 \pm 0,005 \text{ mm}$$

No Tempo 7 (00:00.620):

$$\delta = \frac{(M_{Max} - M_{Min})}{2} = \frac{(21,03 - 21)}{2} = 0,015$$

$$m' = \left( \frac{M_{Max} + M_{Min}}{2} \right) \pm \delta = \left( \frac{21,03 + 21}{2} \right) \pm \delta = 21,015 \pm 0,015 \text{ mm}$$

Portanto, nota-se que na imagem do Tempo 1 (00:00.257), encontra a maior incerteza na medição feita neste experimento com 0,045 de incerteza e as imagens com Tempo 4 (00:00.455) e Tempo 6 (00:00.554), tem a menor incerteza com 0,01 de incerteza.

Para encontrar a incerteza de medição da velocidade de rotação do motor de corrente contínua, utilizando um tacômetro da Politerm modelo Pol-19, foi usado seu manual de instruções que diz que o equipamento tem uma exatidão de ( $\pm 0.05\% + 1$  dígito) ou seja:

- 1° velocidade de 53.05 rpm tem exatidão de:  $53.05 \pm 0,026525$  rpm.
- 2° velocidade de 60.6 rpm tem exatidão de:  $60.6 \pm 0,0303$  rpm.
- 3° velocidade de 68.2 rpm tem exatidão de:  $68.2 \pm 0,00341$  rpm.