

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANDRÉ VINÍCIUS SEGALL ANDO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL  
PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE UMA  
BOLHA DE GÁS ESCOANDO EM LÍQUIDO ESTAGNADO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2021**

ANDRÉ VINÍCIUS SEGALL ANDO ✉

**DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL  
PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE UMA  
BOLHA DE GÁS ESCOANDO EM LÍQUIDO ESTAGNADO**

**DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL APPARATUS  
FOR VELOCITY DETERMINATION OF A GAS  
BUBBLE FLOWING IN STAGNANT LIQUID**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima ✉ 

**PONTA GROSSA**

**2021**



Este Trabalho de Conclusão de Curso está licenciado sob uma Licença Creative Commons Atribuição–NãoComercial–SemDerivações 4.0 Internacional.



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE UMA BOLHA DE GÁS ESCOANDO EM LÍQUIDO ESTAGNADO**

por

**ANDRÉ VINÍCIUS SEGALL ANDO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 19 de março de 2021 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.

**Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima**  
Orientador

**Prof. Dr. Thiago Antonini Alves**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne**  
Membro Titular

**Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares**  
Responsável pelos TCC

**Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de  
Carvalho**  
Coordenador do Curso

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho não poderia ser finalizado sem a ajuda de diversas pessoas e/ou instituições às quais presto meus agradecimentos. Certamente, esses parágrafos não irão abranger a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre estas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

A minha família, pelo carinho, incentivo e total apoio em todos os momentos da minha vida.

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos e pela confiança depositada.

A todos os professores e colegas do departamento, que ajudaram de forma direta e indireta na realização e/ou conclusão deste trabalho.

A todos os demais que de alguma forma contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional.

A UTFPR, pelos recursos disponibilizados e apoio financeiro.

E por fim, a Fundação Araucária pelo apoio financeiro.

## RESUMO

ANDO, André Vinícius Segall. **Desenvolvimento de um aparato experimental para determinação da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado**. 2021. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2021.

Escoamentos multifásicos têm sido estudados há muitas décadas, devido suas aplicações em setores da indústria, como em atividades petrolíferas, no ramo de energia nuclear, em ciclos de refrigeração, entre outros. O estudo de uma bolha de gás alongada escoando em líquido estagnado no interior de tubulações é de grande importância para análise e compreensão de modelos de escoamento multifásico. Muito do conhecimento sobre padrões de escoamento tem sido obtido de forma empírica, o que deixa evidente a importância de estudar e aperfeiçoar métodos experimentais relacionados ao tema. Este trabalho tem por objetivo realizar o projeto e a construção de um aparato experimental para visualização e determinação da velocidade de uma bolha de gás escoando em líquido estagnado, baseando-se em outros trabalhos da literatura. O aparato é composto por uma estrutura de perfis de alumínio e tubos de acrílico, que são fixados por meio de abraçadeiras, assim como válvulas de esfera, entre outros materiais. Por meio desse aparato, pode-se verificar a influência do diâmetro e da inclinação do tubo, assim como da viscosidade do líquido, na velocidade de ascensão de uma bolha de gás. A velocidade da bolha de gás foi determinada por meio do processamento de vídeos gravados na seção de testes do aparato e apresentou satisfatória concordância com a literatura. O aparato se mostra funcional, simples de construir, de baixo custo, de fácil operação e com capacidade de adaptações e aperfeiçoamentos.

**Palavras-chave:** Escoamento multifásico. Análise dimensional. Tubos — Dinâmica dos fluidos.

## ABSTRACT

ANDO, André Vinícius Segall. **Development of an experimental apparatus for velocity determination of a gas bubble flowing in stagnant liquid**. 2021. 49 p. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) — Federal University of Technology — Paraná, Ponta Grossa, 2021.

Multiphase flows have been studied for many decades, due to their applications in industry sectors, such as in petroleum activities, in the nuclear energy sector, in refrigeration cycles, among others. The study of an elongated gas bubble flowing in stagnant liquid inside pipes is of great importance for the analysis and understanding of multiphase flow models. Much of the knowledge about flow patterns has been obtained empirically, which makes evident the importance of studying and improving experimental methods related to the theme. This work aims to carry out the design and construction of an experimental apparatus for visualizing and determining the velocity of a gas bubble flowing in stagnant liquid, based on other works in the literature. The apparatus consists of a structure of aluminum profiles and acrylic tubes, which are fixed by means of clamps, as well as ball valves, among other materials. Through this apparatus, it is possible to verify the influence of the diameter and the inclination of the pipe, as well as the liquid viscosity, in the ascension velocity of a gas bubble. The gas bubble velocity was determined by processing videos recorded in the testing section of the apparatus and showed satisfactory agreement with the literature. The apparatus proves to be functional, simple to build, low cost, easy to operate and capable of adaptations and improvements.

**Keywords:** Multiphase flow. Dimensional analysis. Tubes — Fluid dynamics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações horizontais . . . . .	12
Figura 2 – Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações verticais. . . . .	12
Figura 3 – Modelo para o escoamento de uma bolha alongada em líquido estagnado em um tubo . . . . .	16
Figura 4 – Desenho do aparato experimental feito em aplicativo CAD . . . . .	30
Fluxograma 1 – Demonstrativo do procedimento experimental . . . . .	35
Fotografia 1 – Tubulações para escoamentos multifásicos em uma refinaria de petróleo . . . . .	11
Fotografia 2 – Formato do nariz da bolha alongada obtido experimentalmente .	18
Fotografia 3 – Procedimento operacional realizado no aparato experimental para o caso vertical (90°) . . . . .	37
Fotografia 4 – Procedimento operacional realizado no aparato experimental para o caso inclinado (45°) . . . . .	38
Fotografia 5 – Testes para determinação da velocidade de ascensão de uma bolha alongada de ar escoando em um tubo contendo um líquido estagnado (água) . . . . .	39
Quadro 1 – Comparativo de algumas metodologias da literatura para determinação da velocidade da bolha alongada . . . . .	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Números de Froude ( $Fr$ ) da bolha alongada em líquido estagnado obtidos experimentalmente por Gómez-Bueno (2010), variando a inclinação do tubo . . . . .	25
Tabela 2 – Resumo das principais características de alguns trabalhos experimentais da literatura relacionados ao tema . . . . .	27
Tabela 3 – Dados experimentais obtidos no aparato desenvolvido . . . . .	40
Tabela 4 – Valores médios e desvios padrões das velocidades médias e números de Froude obtidos experimentalmente para os casos analisados . .	41
Tabela 5 – Comparação dos valores de números de Froude obtidos experimentalmente neste trabalho em relação a literatura . . . . .	41

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

### SIGLAS

CAD	Desenho Assistido por Computador, do inglês <i>Computer Aided Design</i>
DAMEC	Departamento Acadêmico de Mecânica
LabMF	Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos
PIV	Velocimetria por Imagem de Partículas, do inglês <i>Particle Image Velocimetry</i>
PVC	Policloreto de Vinila, do inglês <i>PolyVinyl Chloride</i>
QR	Resposta Rápida, do inglês <i>Quick Response</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

### LETRAS LATINAS

$D$	Diâmetro	[m]
$Eo$	Número de Eötvös	
$Fr$	Número de Froude	
$g$	Aceleração gravitacional	[m/s <sup>2</sup> ]
$h$	Espessura de filme	[m]
$L$	Comprimento	[m]
$Mo$	Número de Morton	
$N_{\mu}$	Número de viscosidade inversa	
$P$	Pressão	[Pa]
$Q$	Termo de correção para $Fr$ (WEBER; ALARIE; RYAN, 1986)	
$R$	Raio	[m]
$Re$	Número de Reynolds	
$S_p$	Raio de curvatura	[m]
$t$	Tempo	[s]
$V$	Velocidade relativa	[m/s]
$z$	Coordenada axial	[m]

### LETRAS GREGAS

$\mu$	Viscosidade dinâmica	[kg/(m · s)]
$\nu$	Viscosidade cinemática	[m <sup>2</sup> /s]
$\rho$	Massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Tensão superficial	[N/m]
$\tau$	Tensão cisalhante	[N/m <sup>2</sup> ]
$\theta$	Ângulo de inclinação	[°]

### SUBSCRITOS

$G$	Fase gasosa
$H$	Horizontal
$k$	Uma fase ( $G$ ou $L$ )
$L$	Fase líquida
$T$	Bolha de Taylor (ou alongada)
$V$	Vertical

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	OBJETIVOS	13
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>14</b>
2.1	NÚMEROS ADIMENSIONAIS	14
2.1.1	Número de Froude	14
2.1.2	Número de Eötvös	14
2.1.3	Número de Viscosidade Inversa	15
2.1.4	Número de Reynolds	15
2.1.5	Número de Morton	15
2.2	MODELAGEM TEÓRICA DA VELOCIDADE DA BOLHA ALONGADA	16
2.3	ANÁLISE EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DA BOLHA ALONGADA	17
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
3.1	PROJETO E CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL	29
3.1.1	Estrutura e Pivotamento	29
3.1.2	Tubos e suas Dimensões	31
3.1.3	Abraçadeiras e Rotação dos Tubos	31
3.1.4	Válvulas e Liberação da Fase Gasosa	32
3.1.5	Lista de Material	32
3.2	MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE	33
3.2.1	Projeto de Sensores de Medição	34
3.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>36</b>
4.1	CASOS ANALISADOS	36
4.2	COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	36
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>44</b>
	<b>APÊNDICE A – VISTAS FRONTAL E LATERAL DO APARATO EXPERIMENTAL</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico é um fenômeno que vem sendo estudado há muitas décadas, em virtude da sua ocorrência em muitas aplicações práticas. Por exemplo, observam-se escoamentos multifásicos em diversos setores da indústria, como em atividades petrolíferas, no ramo de energia nuclear, em ciclos de refrigeração, entre outros (SHOHAM, 2006). Este tipo de escoamento ocorre principalmente durante o transporte de misturas contendo gases, líquidos e sólidos, podendo ser da mesma substância (multifásico) ou de substâncias distintas e imiscíveis (multicomponente). A Fotografia 1 mostra exemplos de tubulações em uma refinaria de petróleo, por onde ocorre o transporte de gás natural e petróleo (escoamento gás-líquido).

**Fotografia 1 – Tubulações para escoamentos multifásicos em uma refinaria de petróleo**

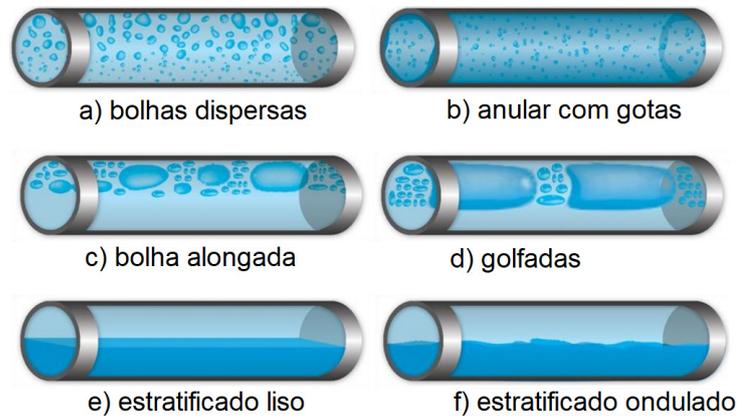


Fonte: Salau (2016).

A importância do estudo deste tipo de fenômeno pode ser fundamentada a partir da necessidade das indústrias de prever custos com perdas de carga e calor, além do dimensionamento de tubulações e sistemas de bombeamento, a fim de otimizar os processos de produção. Em diversas situações, devido à alta complexidade da modelagem de escoamentos multifásicos com mais de duas fases, o sistema pode ser simplificado para um escoamento bifásico dependendo da quantidade relativa de fases presentes na tubulação, o que facilita os cálculos e a compreensão, mas ainda assim se trata de um fenômeno físico complexo (LIMA, 2011).

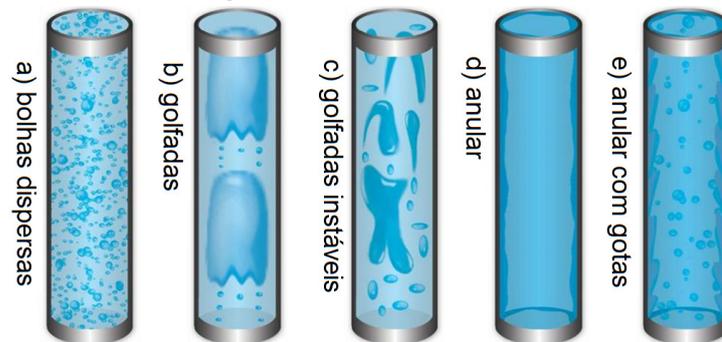
Segundo Bratland (2010), um dos aspectos mais desafiadores do estudo de escoamentos bifásicos é o fato de que esse pode assumir muitas formas ou padrões distintos. Por exemplo, os escoamentos gás-líquido são frequentemente classificados em três padrões principais: disperso, separado e intermitente. Entretanto, esses escoamentos podem ainda apresentar classificações mais específicas. A Figura 1 apresenta seis padrões de escoamento gás-líquido em tubulações horizontais: bolhas dispersas, anular com gotas, bolha alongada, golfadas, estratificados liso e ondulado. A Figura 2 apresenta cinco padrões de escoamento gás-líquido em tubulações verticais: bolhas dispersas, golfadas, golfadas instáveis, anular e anular com gotas.

**Figura 1 – Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações horizontais**



Fonte: adaptada de Bratland (2010).

**Figura 2 – Padrões de escoamento gás-líquido em tubulações verticais.**



Fonte: adaptada de Bratland (2010).

Em alguns desses padrões, a fase gasosa se apresenta na forma de uma sequência de bolhas alongadas (por exemplo, o padrão golfadas), ou ainda, como um aglomerando de bolhas dispersas. Compreender a dinâmica das bolhas permite analisar, de forma relativamente simples, parâmetros fundamentais em escoamentos

mais complexos (WALLIS, 1969). Deste modo, o estudo do comportamento de uma bolha alongada, também denominada de bolha de Taylor (DAVIES; TAYLOR, 1950), é de grande importância para modelagem, análise e compreensão destes escoamentos mais complexos, que ocorrem sob a forma de padrões de escoamento que apresentam estas características.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Muito do conhecimento a respeito dos padrões de escoamento, bem como da dinâmica das bolhas de gás e da fase líquida, tem sido obtido ao longo dos anos de forma empírica, mas com certas limitações operacionais. Além dessas limitações operacionais, a variedade de configurações do sistema e situações práticas de interesse deixam em evidência a importância de estudar e aperfeiçoar as técnicas experimentais e os instrumentos de medição, para permitir a determinação de características importantes desse tipo de escoamento com satisfatória precisão. Os dados obtidos de forma empírica nos escoamentos multifásicos podem ser utilizados tanto para o dimensionamento de sistemas quanto para o desenvolvimento de modelos de escoamento para implementação em simuladores.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral realizar o projeto e a construção de um aparato experimental para permitir a visualização e a determinação da velocidade de uma bolha alongada de gás escoando em líquido estagnado. Esse aparato experimental deve permitir a utilização de tubos com diversos diâmetros e ser capaz de variar a inclinação dos tubos, além de operar com fluidos distintos. Deste modo, os objetivos específicos desse trabalho são:

- Projetar, dimensionar e construir o aparato experimental a partir de informações disponíveis na literatura.
- Realizar testes experimentais preliminares a fim de verificar a operacionalidade do aparato experimental desenvolvido.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Tendo em vista os objetivos deste trabalho, esta revisão da literatura apresenta informações relevantes a respeito da velocidade da bolha alongada ou de Taylor e está dividida da seguinte forma: a Seção 2.1 apresenta os principais números adimensionais utilizados em modelagens matemáticas e correlações empíricas; a Seção 2.2 apresenta uma proposta de modelagem teórica da literatura; a Seção 2.3 apresenta a descrição de alguns trabalhos relacionados com análise experimental.

### 2.1 NÚMEROS ADIMENSIONAIS

Os números adimensionais descritos na sequência tem grande importância para o estudo do escoamento gás-líquido no padrão intermitente, entre outros.

#### 2.1.1 Número de Froude

O número de Froude ( $Fr$ ), que relaciona as forças de inércia e de empuxo, é descrito em termos da velocidade de ascensão da bolha alongada ( $V_T$ ), da aceleração da gravidade ( $g$ ), do diâmetro interno do tubo ( $D$ ) e das massas específicas do gás ( $\rho_G$ ) e do líquido ( $\rho_L$ ), sendo definido pela Equação (1):

$$Fr = \frac{V_T}{\sqrt{gD \frac{\Delta\rho}{\rho_L}}} \quad (1)$$

Sendo que,  $\Delta\rho = \rho_L - \rho_G$  a diferença entre as massas específica do líquido e do gás.

#### 2.1.2 Número de Eötvös

O número de Eötvös ( $Eo$ ), que relaciona as forças de empuxo e de tensão superficial, é descrito em termos da aceleração da gravidade ( $g$ ), do diâmetro interno do tubo ( $D$ ), das massas específicas do gás ( $\rho_G$ ) e do líquido ( $\rho_L$ ) e da tensão superficial do líquido ( $\sigma_L$ ), sendo definido pela Equação (2):

$$Eo = \frac{gD^2\Delta\rho}{\sigma_L} \quad (2)$$

### 2.1.3 Número de Viscosidade Inversa

O número de viscosidade inversa ( $N_\mu$ ), que relaciona as forças de inércia, de empuxo e viscosas, é descrito em termos da aceleração da gravidade ( $g$ ), do diâmetro interno do tubo ( $D$ ), das massas específicas do gás ( $\rho_G$ ) e do líquido ( $\rho_L$ ) e da viscosidade cinemática do líquido ( $\nu_L \equiv \mu_L/\rho_L$ ;  $\mu_L$  é a viscosidade dinâmica do líquido), sendo definido pela Equação (3):

$$N_\mu = \frac{\sqrt{g D^3 \frac{\Delta\rho}{\rho_L}}}{\nu_L} \quad (3)$$

### 2.1.4 Número de Reynolds

O número de Reynolds ( $Re$ ), que relaciona as forças de inércia e viscosas, é descrito em termos da velocidade de ascensão da bolha ( $V_T$ ), do diâmetro interno do tubo ( $D$ ), da massa específica do líquido ( $\rho_L$ ) e da viscosidade dinâmica do líquido ( $\mu_L$ ), sendo definido pela Equação (4):

$$Re = \frac{V_T D \rho_L}{\mu_L} \equiv \frac{V_T D}{\nu_L} \quad (4)$$

O número de Reynolds ainda pode ser representado em termos do número de Froude ( $Fr$ ) e do número de viscosidade inversa ( $N_\mu$ ), de acordo com a Equação (5):

$$Re = Fr N_\mu \quad (5)$$

### 2.1.5 Número de Morton

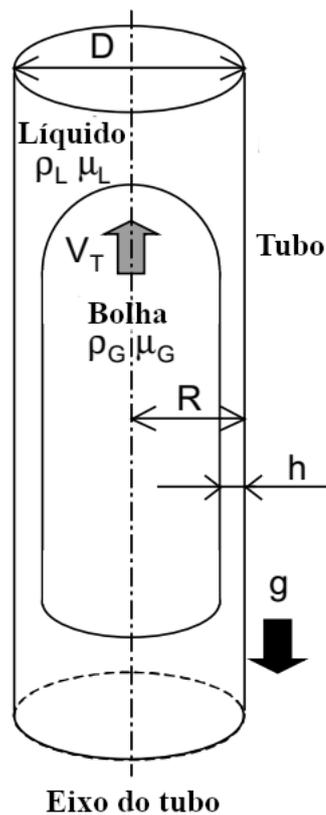
O número de Morton ( $Mo$ ), que relaciona as forças de inércia, viscosas, de empuxo e de tensão superficial, é descrito em termos da aceleração da gravidade ( $g$ ), da viscosidade dinâmica do líquido ( $\mu_L$ ), das massas específicas do gás ( $\rho_G$ ) e do líquido ( $\rho_L$ ) e da tensão superficial do líquido ( $\sigma_L$ ), sendo definido pela Equação (6):

$$Mo = \frac{g \mu_L^4 \Delta\rho}{\rho_L^2 \sigma_L^3} \quad (6)$$

## 2.2 MODELAGEM TEÓRICA DA VELOCIDADE DA BOLHA LONGADA

Hayashi, Kurimoto e Tomiyama (2010) propuseram uma correlação para o número de Froude ( $Fr$ ) de uma bolha alongada em escoamentos verticais, baseado no modelo mostrado na Figura 3. Foram consideradas a velocidade ( $V_k$ ), a pressão ( $P_k$ ), a tensão cisalhante ( $\tau_k$ ), a massa específica ( $\rho_k$ ), a viscosidade dinâmica ( $\mu_k$ ) e a tensão superficial ( $\sigma_k$ ) para cada fase  $k$ , além da espessura de filme de líquido  $h$  (que escoam em torno da bolha alongada), entre outros parâmetros.

**Figura 3 – Modelo para o escoamento de uma bolha alongada em líquido estagnado em um tubo**



Fonte: adaptada de Hayashi, Kurimoto e Tomiyama (2010).

No modelo de Hayashi, Kurimoto e Tomiyama (2010), as Equações (7) e (8) correspondem às equações governantes (conservação de massa e de quantidade de movimento das fases).

$$\nabla \cdot V_k = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_k}{\partial t} + \mathbf{V}_k \cdot \nabla \mathbf{V}_k = -\frac{1}{\rho_k} \nabla P_k + \mathbf{g} + \frac{1}{\rho_k} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_k \quad (8)$$

Para o fechamento do modelo, utilizam-se as Equações (9) e (10), que correspondem às condições interfaciais para fluidos viscosos incompressíveis em temperatura constante:

$$(\mathbf{V}_G - \mathbf{V}_L) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (9)$$

$$-\left(P_G - P_L - \frac{\sigma_L}{R-h}\right) \mathbf{n} + (\boldsymbol{\tau}_G - \boldsymbol{\tau}_L) \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (10)$$

Sendo que,  $R (\equiv D/2)$  o raio do tubo. As tensões cisalhantes das fases gasosa e líquida,  $\tau_G$  e  $\tau_L$ , são definidas pelas Equações (11) e (12), respectivamente:

$$\tau_G = \mu_G \frac{V_T}{R-h} \quad (11)$$

$$\tau_L = \mu_L \frac{V_T}{h} \quad (12)$$

Eles também utilizaram outras correlações experimentais, como o número de Froude proposto por Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) e outra correlação obtida a partir de dados experimentais dos experimentos de Wallis (1969), em condições nas quais é possível desprezar a tensão superficial. Por fim, a correlação proposta por Hayashi, Kurimoto e Tomiyama (2010) é dada pela Equação (13):

$$Fr = \sqrt{\frac{0,0089}{[0,0725 + (1/Re)(1 - 0,11Re^{0,33})] \left(1 + \frac{41}{Eo^{1,96}}\right)^{-4,63}}} \quad (13)$$

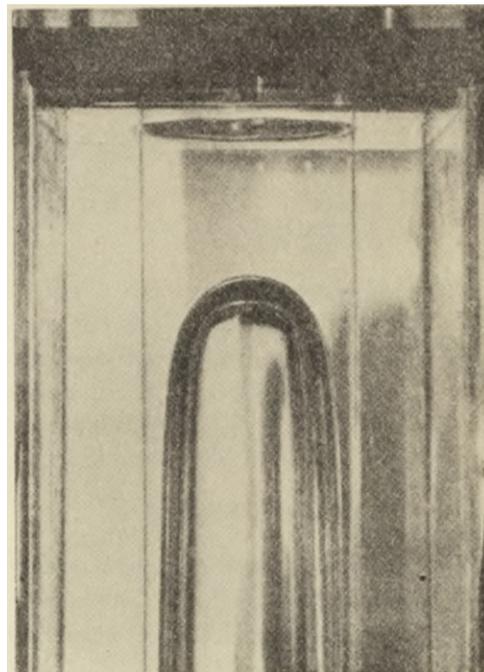
A partir da Equação (13) é possível determinar a velocidade de ascensão da bolha alongada.

### 2.3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DA BOLHA LONGADA

Um dos primeiros experimentos a respeito da velocidade da bolha alongada foi desenvolvido por Davies e Taylor (1950), que estudaram a ascensão de bolhas alongadas de ar em líquido estagnado (água e nitrobenzeno) dentro de um grande tanque e

também em tubos verticais de vidro transparente, preenchidos com água. Tratando-se da metodologia experimental com tubos, três tubos de vidro com comprimento de 180,0 cm e diâmetros de 1,23 cm, 2,16 cm e 7,94 cm foram erguidos verticalmente sobre uma pia e preenchidos colocando as extremidades inferiores sobre uma bacia cheia de água e aplicando sucção nas extremidades superiores. Após o nível de água chegar ao topo, as extremidades superiores foram fechadas, enquanto que as extremidades inferiores foram abertas, permitindo que o líquido saísse sob a forma de uma fina película de água ao redor do diâmetro do tubo enquanto uma bolha se formava e ascendia em direção ao topo. O formato do nariz da bolha foi registrado e pode ser observado na Fotografia 2. As velocidades de ascensão foram medidas cronometrando o tempo de passagem do nariz das bolhas entre duas marcas horizontais colocadas nos tubos em posições determinadas.

**Fotografia 2 – Formato do nariz da bolha alongada obtido experimentalmente**



**Fonte: Davies e Taylor (1950).**

Por meio desse experimento, Davies e Taylor (1950) fizeram análises empíricas a respeito da velocidade da bolha alongada ( $V_T$ ), resultando na Equação (14), que mostrou uma satisfatória precisão e baixa porcentagem de desvio relativo, de acordo com os mesmos:

$$V_T = 0,46\sqrt{\frac{gD}{2}} \quad (14)$$

Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) realizaram experimentos, utilizando uma tubulação de 2,54 cm, e propuseram uma correlação para determinar a velocidade de ascensão da bolha alongada ( $V_T$ ) em uma tubulação vertical preenchida com líquido estagnado e selada no topo. Esta correlação define a velocidade de ascensão da bolha alongada ( $V_T$ ) em função da aceleração da gravidade ( $g$ ), do diâmetro interno ( $D$ ) e da constante 0,35 (obtida pelo número de Froude para escoamentos verticais), sendo expressa pela Equação (15):

$$V_T = 0,35\sqrt{gD} \quad (15)$$

Zukoski (1966) realizou experimentos para analisar a influência da viscosidade do líquido, da tensão superficial e do ângulo de inclinação na movimentação de bolhas alongadas em tubos preenchidos com líquido estagnado. Ele utilizou diversos líquidos, como água, tetracloreto de carbono, mercúrio, glicerina, álcool etílico e misturas desses compostos, além de diferentes diâmetros de tubos, variando de 5,0 cm a 17,8 cm, em sua maioria feitos de vidro. As velocidades das bolhas foram calculadas a partir da medição dos tempos em que as bolhas passavam por um determinado comprimento de tubo, para várias combinações de líquidos e inclinações de tubulação.

Por meio desse experimento, Zukoski (1966) pôde ainda analisar a variação dos números de Froude ( $Fr$ ), de Eötvös ( $Eo$ ) e de Reynolds ( $Re$ ). Ele verificou que o comprimento de bolha não tem relação com a velocidade da mesma, nos casos em que o comprimento é, pelo menos, três vezes o diâmetro da bolha. Também observou que a velocidade de ascensão da bolha não sofre influência da viscosidade para inclinações de  $30^\circ$  a  $90^\circ$  em relação à horizontal. Logo, para números de Reynolds maiores que 200, a influência da viscosidade torna-se desprezível. Ele ainda notou que para números de Eötvös maiores que 40, a influência desse número adimensional também torna-se desprezível. Assim, o número de Froude fica em torno de 0,35 da mesma forma que Nicklin, Wilkes e Davidson (1962) propôs para baixas viscosidades de fluido.

Maneri e Zuber (1974) fizeram experimentos injetando ar pressurizado de um cilindro, com controle por meio de uma válvula, em três diferentes tanques de vidro, cheios de líquido estagnado. Por meio da inclinação desses tanques em até  $90^\circ$  medidos com um transferidor a partir da vertical, durante os testes, foi possível analisar a influência de propriedades de fluidos em escoamentos gás-líquido bidimensionais

inclinados. Os dados foram obtidos por meio de técnicas de fotografias e retro-iluminação. Eles puderam observar que não houve diferença entre as velocidades terminais das bolhas em escoamentos verticais na água e no metanol. Já em escoamentos inclinados, mudanças observadas no nariz da bolha relacionadas ao ângulo de inclinação mostram que é considerável o efeito da tensão superficial. Como o número de Eötvös modela a tensão superficial, eles utilizaram a expressão definida pela Equação (16) para modelo da velocidade terminal da bolha:

$$V_T(\theta) \approx f\left(\frac{1}{Eo}\right) \quad (16)$$

Maneri e Zuber (1974) ainda propuseram que inclinação e tensão superficial, de forma combinada, influenciam na velocidade e formato da bolha, além de eliminar a influência da força de empuxo de modo que o número de Froude pode ser escrito em função do formato do nariz da bolha e de raio de curvatura  $S_p$  e do ângulo  $\theta$  em relação a horizontal, conforme a Equação (17):

$$Fr(\theta) = S_p \sqrt{\cos \theta} \quad (17)$$

Desta forma, eles puderam concluir que o escoamento inclinado é independente das propriedades dos fluidos para inclinações entre  $0^\circ$  e  $10^\circ$  com relação a vertical para grandes diâmetros. Já para inclinações entre  $10^\circ$  e  $30^\circ$ , o escoamento começa a sofrer influência das propriedades dos fluidos. Por fim, entre  $30^\circ$  e  $90^\circ$  os escoamentos sofrem influência das propriedades dos fluidos para grandes diâmetros.

Spedding e Nguyen (1978) realizaram experimentos sobre a ascensão de bolhas de ar filtrado em tubos preenchidos com água destilada. Eles utilizaram tubos de acrílico fixados em uma estrutura de vigas de alumínio com seção quadrada, que podem rotacionar da horizontal para a vertical. Essa estrutura permitiu que uma câmera acompanhasse a ascensão das bolhas, usando um sistema de polias, de forma a registrar o desenvolvimento da bolha em até quatro quadros por segundo. As velocidades de ascensão foram determinadas a partir dos tempos em que as bolhas passavam entre duas marcações nos tubos, registrados com um cronômetro. Nos experimentos, os volumes de bolha variaram de  $20 \text{ cm}^3$  a  $3500 \text{ cm}^3$ . Os tubos tinham 4 m de comprimento, com diâmetros de 1,94 cm, 2,54 cm, 3,19 cm, 3,84 cm, 4,45 cm, 4,55 cm e 5,67 cm, sendo divididos em duas seções separadas por uma válvula de gaveta.

Experimentos realizados por Weisman e Kang (1981), mostraram que, apesar de frequentemente as propriedades dos escoamentos bifásicos serem consideradas como constantes para variações de inclinações nas tubulações, as características de alguns desses padrões de escoamento podem se modificar de acordo com o ângulo de inclinação. Eles utilizaram um aparato com tubulações de vidro transparente com aproximadamente 6 m de comprimento e diâmetros de 1,2 cm, 2,5 cm e 5,1 cm que foi construído para que as linhas possam ser inclinadas em até 7° para cima com relação a horizontal ou posicionadas na vertical. Um escoamento bifásico de ar e água foi analisado nessas linhas por medidores de orifício à uma pressão quase atmosférica. Como resultado, eles puderam observar como a inclinação dos tubos afeta o comportamento dos padrões de escoamento.

Bendiksen (1984) realizou experimentos em um aparato com tubos de acrílico transparente, sustentados por uma estrutura de barras de alumínio, pivotados de uma forma que permitia inclinações com ângulos de até 180° com relação a horizontal, abrangendo diferentes vazões de líquido e também com líquido estagnado. Os tubos possuíam comprimentos de 10 m, 7 m e 4 m com diâmetros internos de 1,92 cm, 2,42 cm e 5,0 cm. As velocidades das bolhas foram medidas utilizando transistores emissores/detectores posicionados arbitrariamente ao longo dos tubos e conectados a um circuito eletrônico. As velocidades médias das bolhas foram calculadas em função da distância e do tempo medido entre transistores por meio da variação de sinal. Em seus estudos, Bendiksen (1984) propôs uma correlação para o número de Froude em função da inclinação da tubulação com relação a horizontal ( $\theta$ ), do número de Froude calculado para o escoamento na horizontal ( $Fr_H = 0,542$ ) e do número de Froude calculado para o escoamento na vertical ( $Fr_V = 0,345$ ), de acordo com a Equação (18):

$$Fr(\theta) = Fr_H \cos \theta + Fr_V \sin \theta \quad (18)$$

Os valores da correlação de Bendiksen (1984) comparados aos valores experimentais observados em seu experimento e também aos valores propostos por Zukoski (1966) possuem concordância em torno de 1%.

Weber, Alarie e Ryan (1986) realizaram experimentos para calcular a velocidade da bolha de Taylor em sete tubos de vidro com diâmetros internos de 0,60 cm, 0,81 cm, 0,91 cm, 1,05 cm, 1,35 cm, 2,21 cm e 3,73 cm para sete inclinações com ângulo entre

15° e 90°, variando de 15° para cada teste, com relação a vertical além de realizar experimentos com tubos na horizontal também. Foram utilizados fluidos a base de água destilada com diferentes propriedades físicas. A extremidade inferior dos tubos foi fechada com uma rolha de borracha, enquanto que a extremidade superior foi conectada com uma abraçadeira metálica, a uma mangueira flexível. Após preencher os tubos com líquido, por meio da mangueira flexível, a rolha foi retirada da extremidade inferior, permitindo que o líquido saísse formando a bolha de Taylor. Os tempos de ascensão das bolhas foram cronometrados entre determinadas marcas nos tubos para posteriormente serem calculadas as velocidades médias.

Com esses experimentos, Weber, Alarie e Ryan (1986) puderam observar que a correlação de Bendiksen (1984) se mostrou discrepante em relação aos resultados experimentais obtidos com fluidos mais viscosos ou para baixos números de Eötvös. Um termo de correção ( $Q$ ) foi proposto para a Equação (18) de Bendiksen (1984) de forma que o número de Froude possa ser calculado em função da diferença entre o número de Froude vertical ( $Fr_V$ ) e o número de Froude horizontal ( $Fr_H$ ), de acordo com as Equações (19) e (20):

$$Fr(\theta) = Fr_H \cos \theta + Fr_V \sin \theta + Q \quad (19)$$

$$Q = \begin{cases} 0 & \text{se } \Delta Fr \leq 0 \\ 1,37(\Delta Fr)^{2/3} \sin \theta (1 - \sin \theta) & \text{se } \Delta Fr > 0 \end{cases} \quad (20)$$

Essa correlação diminuiu a discrepância em relação aos valores experimentais de 15% para 10%. Weber, Alarie e Ryan (1986) notaram ainda que o número de Froude continua aumentando em função do número de Eötvös em escoamentos inclinados. Já para escoamentos com alta tensão superficial ou baixa viscosidade, ou seja, baixo número de Morton, essa relação se mostra independente do fluido de acordo com o observado por Zukoski (1966).

Hasan e Kabir (1988) tentaram prever o comportamento do escoamento multifásico em um poço desviado. O modelo proposto por eles baseou-se no comportamento experimental de escoamentos bifásicos e também da ascensão de bolhas em líquido estagnado. Os experimentos foram realizados utilizando tubos de 4,8 cm, 5,7 cm e 8,7 cm de diâmetro, com comprimento de 5,5 m, variando a inclinação em até 32° a partir da

vertical, por meio de um sistema de correntes e suportes. As velocidades das bolhas foram determinadas por meio da medição dos tempos em que as bolhas levavam para passar por uma seção de 3 m de comprimento de tubo.

Carew, Thomas e Johnson (1995) realizaram estudos de forma semi-empírica onde puderam propor uma correlação que descreve o movimento das bolhas em tubos inclinados. O experimento realizado por eles utilizou variados diâmetros de tubo (2,5 cm, 4,5 cm e 7,0 cm) que foram fixados a uma estrutura de metal em formato de “A”, pivotando o centro do tubo na estrutura. Os tubos parcialmente cheios com o líquido de interesse, mas com ar suficiente para formar uma bolha de Taylor, foram fechados em suas duas extremidades com tampas de rosca e rotacionados rapidamente até a inclinação de interesse. A velocidade da bolha foi medida de forma automatizada por um cronômetro digital, sendo acionado e interrompido por dois sensores óticos de infravermelho. A correlação obtida por eles é válida para altos valores de número de Reynolds, em diâmetros entre 2,16 cm e 17,8 cm. Eles consideraram o filme constante ao longo de toda a bolha, mesmo para os escoamentos inclinados, e puderam observar que o aumento da viscosidade ou da tensão superficial resulta em diminuição da velocidade de ascensão, de acordo com a Equação (21):

$$\log Fr = 0,25z \left[ \left( \frac{\log Re - 1,08}{z} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} + 0,25 (\log Re - 1,08) \quad (21)$$

sendo  $z$  a coordenada axial. Para números de Reynolds com valor inferior a 1, devido à altíssima influência da viscosidade, a velocidade torna-se menos dependente da inclinação do tubo.

Polonsky, Shemer e Barnea (1999) analisaram experimentalmente a relação entre a movimentação da bolha de Taylor e o campo de velocidades à frente dela. Os testes foram realizados em um tubo vertical de acrílico, com diâmetro de 2,5 cm e comprimento de 4 m, preenchido com água. As velocidades das bolhas de ar foram determinadas por meio do processamento digital de imagens registradas por duas câmeras, enquanto um sistema de PIV (Velocimetria por Imagem de Partículas, do inglês *Particle Image Velocimetry*) registrava o campo de velocidades ao redor da bolha.

Shosho e Ryan (2001) estudaram a movimentação de bolhas alongadas em tubos inclinados de forma experimental. Os tubos utilizados nos experimentos tinham 1,22 m de comprimento, com diâmetros internos de 1,27 cm, 1,91 cm, 2,54 cm, 3,18 cm

e 3,81 cm, sendo fixados a uma estrutura que inclinava de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  em relação a horizontal. As velocidades de ascensão das bolhas foram medidas em cada tubo com inclinações de  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  e  $90^\circ$  com relação a horizontal, utilizando um cronômetro manual. A distância utilizada para cronometrar o tempo se iniciava no meio do tubo e terminava na extremidade superior (0,61 m). Os experimentos foram realizados utilizando diferentes líquidos newtonianos e não newtonianos, incluindo água e várias misturas de xarope de milho e água para abranger uma ampla faixa de viscosidades de líquido.

Hout, Barnea e Shemer (2002) realizaram experimentos com escoamentos bifásicos em golfadas e líquido estagnado utilizando dois tubos transparentes de plástico paralelos com 10 m de comprimento e diâmetros internos de 2,4 cm e 5,4 cm onde o sistema podia ser inclinado em um ângulo de até  $90^\circ$  com relação a horizontal. As velocidades das bolhas foram medidas por meio do tratamento de sinais de sondas de fibra ótica e de técnicas de processamento das imagens obtidas por uma câmera. Eles puderam observar que as extrapolações de escoamentos em líquido estagnado para o escoamento em golfadas se mostraram inadequadas. Contudo, os resultados experimentais se mostraram de acordo com as relações da literatura para líquido estagnado, com erro menor que 10% em relação a correlação de Bendiksen (1984).

Rocha e Rosa (2006) analisaram experimentalmente a ascensão de uma bolha de ar escoando em tubos verticais contendo líquido estagnado. A seção de teste utilizada consistia em dois tubos de acrílico transparente com 26 mm de diâmetro interno. O tubo onde foram realizados testes com água possuía 2050 mm de comprimento, enquanto que o tubo onde foram realizados testes com glicerina possuía 1680 mm de comprimento. As extremidades superiores dos tubos foram fechadas e válvulas de passagem livre foram instaladas nas extremidades inferiores, para realizar testes com as mesmas fechadas ou com a drenagem total dos líquidos contidos nos tubos. Um tubo graduado menor, com 210 mm de comprimento, foi instalado na extremidade inferior das válvulas de passagem para medir os volumes de ar que seriam liberados nos experimentos com ambas as extremidades dos tubos fechadas. Os tempos de ascensão das bolhas foram registrados, utilizando um cronômetro manual, e as velocidades de ascensão foram calculadas a partir desses parâmetros.

Gokcal, Al-Sarkhi e Sarica (2009) estudaram os efeitos da alta viscosidade do óleo na velocidade de deslizamento de bolhas de ar em tubos horizontais e inclinados,

por meio de observações experimentais. O complexo experimental utilizado nos experimentos possuía um tubo de 18,9 m de comprimento e diâmetro interno de 5,08 cm, com uma seção de 9,15 m de comprimento, constituída de acrílico transparente, que foi utilizado para medir a velocidade de deslizamento no escoamento horizontal. Outro tubo de 3,05 m de comprimento e diâmetro interno de 5,08 cm, fabricado em acrílico, foi adicionado ao complexo e podia ser inclinado em até 90° com relação à horizontal. Água e óleo foram utilizados nos experimentos, sendo que o óleo foi aquecido ou resfriado para atingir a viscosidade desejada. Os tempos de deslizamento das bolhas foram registrados, utilizando sensores a laser, enquanto que as velocidades foram calculadas a partir desses parâmetros.

Gómez-Bueno (2010) realizou um estudo experimental de escoamentos líquido-gás intermitentes em tubulações inclinadas. Por meio desse estudo, ele comparou propriedades e correlações propostas em diversos trabalhos, alguns deles descritos nessa revisão de literatura, com dados obtidos de diversas análises experimentais. A Tabela 1 relaciona valores de  $Fr$ , obtidos experimentalmente por ele, para diversas inclinações de tubo em casos de ascensão de bolhas em líquido estagnado.

**Tabela 1 – Números de Froude ( $Fr$ ) da bolha alongada em líquido estagnado obtidos experimentalmente por Gómez-Bueno (2010), variando a inclinação do tubo**

Inclinação, $\theta$ (°)	$Fr$ (experimental)	Fator de correção	$Fr$ (corrigido)
90	0,356	0,968	0,345
75	0,413	0,969	0,401
60	0,460	0,971	0,447
45	0,492	0,974	0,479
30	0,493	0,980	0,483
15	0,464	0,988	0,459
5	0,436	0,995	0,434

Fonte: adaptada de Gómez-Bueno (2010).

Jeyachandra et al. (2012) estenderam o trabalho de Gokcal, Al-Sarkhi e Sarica (2009), utilizando o mesmo complexo experimental, com diferentes diâmetros de tubos e mais variações de viscosidade para estudar as relações de velocidade de deslizamento em escoamento bifásico em golfadas, para óleos de alta viscosidade. Nesse trabalho, eles utilizaram tubos com diâmetros internos de 50,8 mm, 76,2 mm e 152,4 mm. As velocidades de deslizamento foram determinadas por meio de sensores óticos no tubo de 152,4 mm, enquanto que no restante dos tubos foram utilizados sensores a laser.

Moreiras et al. (2014) analisaram a velocidade de deslizamento de grandes bolhas em fluidos viscosos estagnados em tubos. Neste estudo, eles utilizaram um

aparato experimental com um tubo de acrílico de 3,05 m de comprimento e 50,8 mm de diâmetro. A inclinação do tubo podia variar entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  com relação a horizontal, utilizando um sistema de polias. Os fluidos de trabalho utilizados são ar e óleo mineral, que foram aquecidos ou resfriados para obter a massa específica desejada. A velocidade de deslizamento da bolha foi determinada por meio do tratamento de imagens, feitas por uma câmera digital de alta velocidade, de forma a ser possível registrar o tempo de passagem da bolha entre duas marcações no tubo com uma distância conhecida.

Vinhas (2015) estudou o movimento da bolha de Taylor em uma coluna vertical, ligeiramente inclinável e com líquido estagnado por meio de uma técnica de visualização. A instalação experimental, utilizada por ele, consistiu de uma coluna de líquido estagnado composta por um tubo de acrílico com 24,0 mm de diâmetro interno e 2,0 m de comprimento. Os experimentos foram realizados com o tubo parcialmente cheio com o fluido de trabalho, de modo a formar um bolsão de ar no topo, alternando entre seis ângulos pré-estabelecidos em relação a vertical ( $0^\circ$ ;  $2,5^\circ$ ;  $5^\circ$ ;  $7,5^\circ$ ;  $10^\circ$ ;  $15^\circ$ ). Os fluidos de trabalho utilizados foram água destilada e glicerina a 100%. A velocidade e outras propriedades das bolhas foram obtidas por meio do processamento de imagens feitas por uma câmera digital de alta velocidade.

Lizarraga-Garcia, Buongiorno e Bucci (2016) realizaram experimentos para obter um modelo analítico de drenagem de filme e critério de ruptura para bolhas de Taylor em tubos redondos inclinados com fluxo lento. Os experimentos utilizaram um tubo de policarbonato com diâmetro 12,7 mm, com inclinações de  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $37,5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ , e  $90^\circ$  com relação a horizontal. Os líquidos utilizados foram metanol e etanol, assim como três misturas de água destilada e metanol. Para determinar a velocidade de ascensão da bolha e outras propriedades, foi utilizada uma câmera digital de alta velocidade, com posterior tratamento das imagens registradas.

Azevedo, Faccini e Su (2020) estudaram experimentalmente bolhas de Taylor em ascensão, em tubos de acrílico verticais circulares ligeiramente inclinados. Os experimentos foram realizados com os tubos parcialmente completos com líquidos estagnados, como água destilada, glicerina pura e misturas de água e glicerina. Os tubos tinham 2,0 m de comprimento e diâmetros de 19,0 mm, 24,0 mm e 34,0 mm. As propriedades das bolhas analisadas durante os testes foram determinadas por meio do tratamento de imagens (vídeos) e sinais obtidos utilizando câmeras digitais de alta velocidade, assim como transdutores de sinais ultrassônicos.

A Tabela 2 resume as principais características de alguns trabalhos experimentais, pesquisados nessa revisão da literatura, que foram realizados com o intuito de estudar a ascensão de bolhas de gás em líquido estagnado. As características desses trabalhos que são descritas na Tabela 2 são: comprimento ( $L$ ), diâmetro ( $D$ ) e inclinação ( $\theta$ ) do tubo; fluidos de trabalho; instrumentos de medição.

**Tabela 2 – Resumo das principais características de alguns trabalhos experimentais da literatura relacionados ao tema**

Referência	$L$ (m)	$D$ (mm)	$\theta$ (°)	Fluidos de trabalho	Instrumentos de medição
Davies e Taylor (1950)	1,8	12,3; 21,6; 79,4	90	Ar e água	Cronômetro manual
Nicklin, Wilkes e Davidson (1962)	-	25,4	90	Ar e água	-
Zukoski (1966)	-	50,0-178,0	0-90	Ar e vários líquidos	Cronômetro manual
Maneri e Zuber (1974)	0,914	<i>a</i>	5-90	Ar, água e metanol	Câmera fotográfica
Spedding e Nguyen (1978)	4,0	<i>b</i>	0-90	Ar e água	Cronômetro manual
Bendixsen (1984)	4,0; 7,0; 10,0	19,2; 24,2; 50,0	-90-90	Ar e água	Transistores
Weber, Alarie e Ryan (1986)	1,2	<i>c</i>	0-90	Ar e vários líquidos	Cronômetro manual
Hasan e Kabir (1988)	5,5	48,0; 57,0; 87,0	58-90	Ar e água	Cronômetro manual
Carew, Thomas e Johnson (1995)	-	25,0; 45,0; 70,0	0-90	Ar e várias soluções	Sensores de infravermelho
Polonsky, Shemer e Barnea (1999)	4,0	25,0	90	Ar e água	Processamento de vídeos
Shosho e Ryan (2001)	1,22	<i>d</i>	5-90	Ar e diversos líquidos newtonianos e não newtonianos	Cronômetro manual
Hout, Barnea e Shemer (2002)	10,0	24,0; 54,0	0-90	Ar e água	Sondas de fibra ótica e câmera
Rocha e Rosa (2006)	2,05; 1,68	26,0	90	Ar, água e glicerina	Cronômetro
Gokcal, Al-Sarkhi e Sarica (2009)	18,9; 3,05	50,8	0-90	Ar, água e óleo	Sensores a laser
Gómez-Bueno (2010)	9,0	25,4	0-90	Ar e água	Sondas de impedância
Jeyachandra et al. (2012)	18,9; 3,05	50,8; 76,2; 152,4	0-90	Ar, água e óleo	Sensores a laser e óticos
Moreiras et al. (2014)	3,05	50,8	0-90	Ar e óleo mineral	Processamento de vídeos
Vinhas (2015)	2,0	24,0	0-15	Ar, água destilada e glicerina a 100%	Processamento de vídeos

(continua)

**Tabela 2 – Descrição de alguns trabalhos da literatura relacionados ao tema (continuação)**

<b>Referência</b>	<b>L(m)</b>	<b>D (mm)</b>	<b><math>\theta(^{\circ})</math></b>	<b>Fluidos de trabalho</b>	<b>Instrumentos de medição</b>
Lizarraga-Garcia, Buongiorno e Bucci (2016)	-	12,7	5-90	Ar, metanol, etanol e três misturas de água destilada e metanol	Processamento de vídeos
Azevedo, Faccini e Su (2020)	2,0	19,0; 24,0; 34,0	75-90	Ar, água destilada, glicerina pura e misturas de água e glicerina	Processamento de vídeos e sinais ultrassônicos

<sup>a</sup> Área retangular: (63,5; 152,4; 863,6) × (9,53; 12,7).

<sup>b</sup> 19,4; 25,4; 31,9; 38,4; 44,5; 45,5; 56,7.

<sup>c</sup> 6,0; 8,1; 9,1; 10,5; 13,5; 22,1; 37,3.

<sup>d</sup> 12,7; 19,1; 25,4; 31,8; 38,1.

Fonte: autoria própria (2021).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

O aparato experimental desenvolvido neste trabalho tem por finalidade permitir a visualização e a determinação da velocidade de uma bolha de gás, que escoar em um líquido estagnado contido num tubo. Nesse aparato, é possível analisar a influência tanto do diâmetro quanto da inclinação do tubo, assim como das propriedades dos fluidos, como a viscosidade do líquido, na determinação da velocidade da bolha de gás. O aparato é composto por uma estrutura de perfis de alumínio, tubos de acrílico transparente (com diferentes diâmetros, fixados por meio de abraçadeiras metálicas que permitem rotação) e válvulas de esfera para liberação da fase gasosa. Um desenho do aparato feito em aplicativo de Desenho Assistido por Computador, do inglês *Computer Aided Design* (CAD), pode ser visto na Figura 4, que apresenta também em detalhe as válvulas de esfera, as abraçadeiras metálicas e os sensores de medição. O Apêndice A apresenta as vistas frontal e lateral do aparato com cotas em mm.

As atividades de projeto, construção e determinação da velocidade foram realizadas com base nos experimentos conduzidos nos diversos trabalhos da literatura, cujas descrições são apresentadas no Capítulo 2. Na sequência, a Seção 3.1 apresenta uma descrição do projeto e construção do aparato experimental (contendo a lista de material utilizado), a Seção 3.2 apresenta a metodologia empregada na determinação da velocidade da bolha alongada e, por fim, a Seção 3.3 apresenta o procedimento experimental para utilização do aparato.

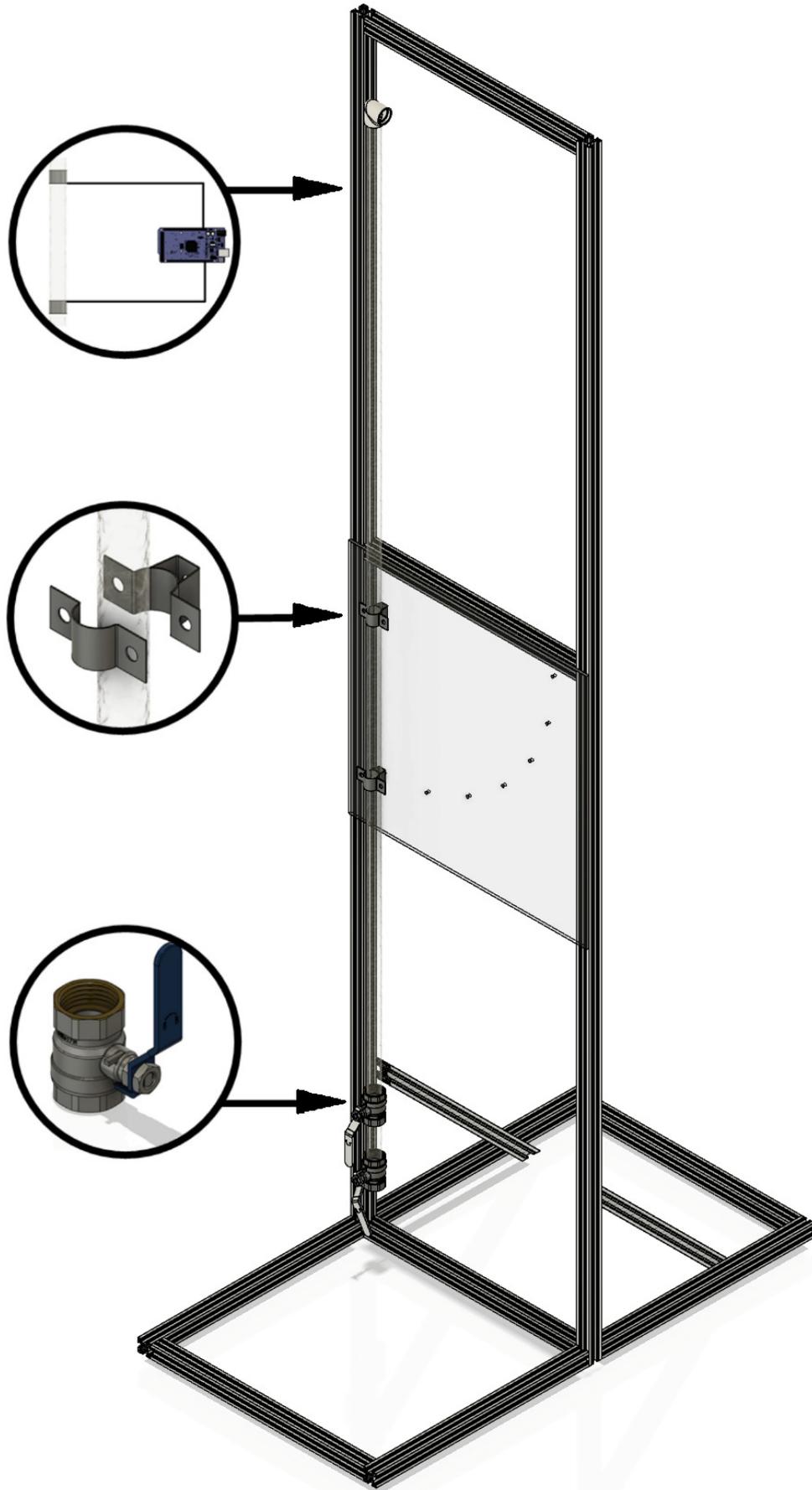
#### 3.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

A presente seção apresenta descrições dos componentes e suas funcionalidades (estrutura, tubos, abraçadeiras e válvulas), assim como a lista de material necessária à construção do aparato experimental.

##### 3.1.1 Estrutura e Pivotamento

Um aspecto importante do aparato experimental é a estrutura, que suporta os tubos preenchidos com diversos líquidos e deve fazê-lo de forma robusta ao mesmo tempo que seja leve e de baixo custo. Um material que se enquadra nesses requisitos é

Figura 4 – Desenho do aparato experimental feito em aplicativo CAD



Fonte: autoria própria (2021).

o alumínio, que foi usado na estrutura do experimento de Bendiksen (1984) e também é utilizado, na forma de perfis estruturais extrudados, para a construção da estrutura do presente aparato. A geometria da estrutura tem formato semelhante ao utilizado na construção do experimento de Carew, Thomas e Johnson (1995), onde uma dada posição na metade do tubo com líquido é pivotada ao centro da estrutura, de forma que permita a rotação do mesmo. Nesse aparato, o ponto de pivotamento do tubo está localizado a mais de 1 m de altura em relação à base da estrutura, permitindo a utilização de tubos com até 2 m de comprimento.

### 3.1.2 Tubos e suas Dimensões

Os tubos podem ser considerados como a parte principal do aparato, pois é no interior deles que ocorre o fenômeno a ser estudado. Para que seja possível visualizar a bolha alongada, é necessário que estes tubos sejam de um material transparente, além de serem de fácil fabricação e/ou possuírem baixo custo. Assim como nos experimentos de Bendiksen (1984) e Hout, Barnea e Shemer (2002), o presente aparato utiliza tubos de acrílico, já que esse material cumpre com os requisitos apresentados. Os tubos precisam ter comprimento suficiente para permitir o desenvolvimento completo da bolha de Taylor (ou alongada) e a determinação da velocidade da mesma. Como pretende-se utilizar tubos com diâmetros internos de 12,7 mm e 25,4 mm e comprimento de 2 m, verificou-se que estas dimensões são próximas às utilizadas nos experimentos de Davies e Taylor (1950), que sem mostraram suficientes para o completo desenvolvimento da bolha e determinação da sua velocidade. Para a retenção do gás, são utilizados tubos de Policloreto de Vinila, do inglês *PolyVinyl Chloride* (PVC), de 0,1 m de comprimento, montados entre duas válvulas de esfera (também de PVC).

### 3.1.3 Abraçadeiras e Rotação dos Tubos

A mudança de inclinação dos tubos é possível por meio da rotação da abraçadeira, localizada próxima ao centro da estrutura de alumínio e ao meio da seção (maior) do tubo preenchido com líquido, de forma que permita rotação completa em torno do parafuso central usado para fixar a abraçadeira na estrutura. Uma segunda abraçadeira, do mesmo tipo da primeira, é utilizada para garantir a fixação da seção (maior) do

tubo e evitar vibrações que possam atrapalhar o desenvolvimento da bolha de gás durante os experimentos. Ambas as abraçadeiras devem ser presas em uma chapa de acrílico (transparente), fixa na região central do aparato. O círculo que representa uma ampliação de imagem, no meio da Figura 4, mostra o desenho feito em aplicativo CAD do posicionamento das abraçadeiras de duas peças com relação ao tubo de acrílico na região frontal do aparato, com uma chapa também de acrílico apresentando furos que permitem fixar o tubo em inclinações de  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ , e  $90^\circ$  com relação à horizontal.

#### 3.1.4 Válvulas e Liberação da Fase Gasosa

Para retenção e liberação da fase gasosa (ou um líquido imiscível menos denso) na parte inferior dos tubos, devem ser utilizadas duas válvulas de esfera, por essas permitirem liberação total do fluxo, sem a necessidade de um controle de vazão a priori, além de serem de fácil instalação e apresentarem baixo custo. A válvula funciona por meio do movimento de rotação da haste que pode liberar ou reter a vazão de um sistema de forma fácil e imediata. O círculo que representa uma ampliação de imagem, na parte inferior da Figura 4, mostra o desenho feito em aplicativo CAD de uma válvula de esfera. As válvulas também são os conectores entre as seções maiores de tubos (de acrílico), onde está o líquido estagnado, e as seções menores (de PVC), onde se encontram os volumes de gás (inicialmente), sendo responsáveis pela liberação do gás e inicialização do processo de ascensão da bolha.

#### 3.1.5 Lista de Material

Na sequência, tem-se uma lista que mostra o material necessário para permitir a montagem do aparato experimental. Não constam nessa lista, as ferramentas e os consumíveis que devem ser utilizados durante o processo de montagem.

- a) 10 m de alumínio perfilado em barras;
- b) 4 pés niveladores (reguláveis) (opcional);
- c) 20 cantoneiras, junções em “T” ou buchas internas para alumínio perfilado em barras;
- d) 45 parafusos, 45 porcas, e arruelas (quantidade e tamanho variam em

- função do sistema de fixação definido);
- e) 2 tubos de acrílico transparente de 2 m de comprimento e diâmetros nominais de 1/2 polegada e 1 polegada, respectivamente;
  - f) 2 tubos de PVC de 0,1 m de comprimento e diâmetros nominais de 1/2 polegada e 1 polegada, respectivamente;
  - g) 2 válvulas de esfera com diâmetro interno de 1/2 polegada;
  - h) 2 válvulas de esfera com diâmetro interno de 1 polegada;
  - i) 1 chapa de acrílico transparente com dimensões aproximadas de 560 mm por 560 mm e espessura de 5 mm;
  - j) 2 cotovelos de 90° para tubos, com diâmetros nominais de 1/2 polegada e 1 polegada, respectivamente;
  - k) 4 abraçadeiras para tubos do tipo união horizontal ou colar.

### 3.2 MÉTODO DE DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE

Davies e Taylor (1950) e Zukoski (1966) mediram a velocidade de ascensão da bolha alongada cronometrando o tempo em que cada nariz (ou frente) de bolha levava para passar entre duas marcações nos tubos, cuja distância linear era conhecida ou definida, a priori. Bendiksen (1984), Carew, Thomas e Johnson (1995) e Hout, Barnea e Shemer (2002) optaram por instalar e programar sensores nos tubos, para que esses identifiquem a passagem da bolha alongada entre um par de sensores emissores-receptores de forma que seja possível calcular a velocidade média em função do tempo de passagem e da distância linear entre sensores. Por outro lado, Vinhas (2015) determinaram as velocidades por meio da análise e do processamento de vídeos obtidos por câmeras digitais. O Quadro 1 resume estas três principais metodologias encontradas na literatura para determinação da velocidade da bolha alongada.

**Quadro 1 – Comparativo de algumas metodologias da literatura para determinação da velocidade da bolha alongada**

Referências	Método	Material
Davies e Taylor (1950) e Zukoski (1966)	Medição do intervalo de tempo entre duas posições	Cronômetro e escala
Bendiksen (1984), Carew, Thomas e Johnson (1995) e Hout, Barnea e Shemer (2002)	Utilização de sensores eletrônicos	Placa de prototipagem eletrônica e sensores
Vinhas (2015)	Análise e processamento de imagens (ou vídeos)	Câmera digital e computador

Em virtude de limitações de tempo para o desenvolvimento deste projeto, o presente trabalho utiliza a análise e processamento de vídeos como método para determinação da velocidade de ascensão das bolhas alongadas, semelhante ao trabalho de Vinhas (2015). A análise e o processamento dos vídeos gravados durante os experimentos foram realizados usando o aplicativo **Shotcut** [↗](#), que é um editor de vídeo multiplataforma, gratuito e de código aberto.

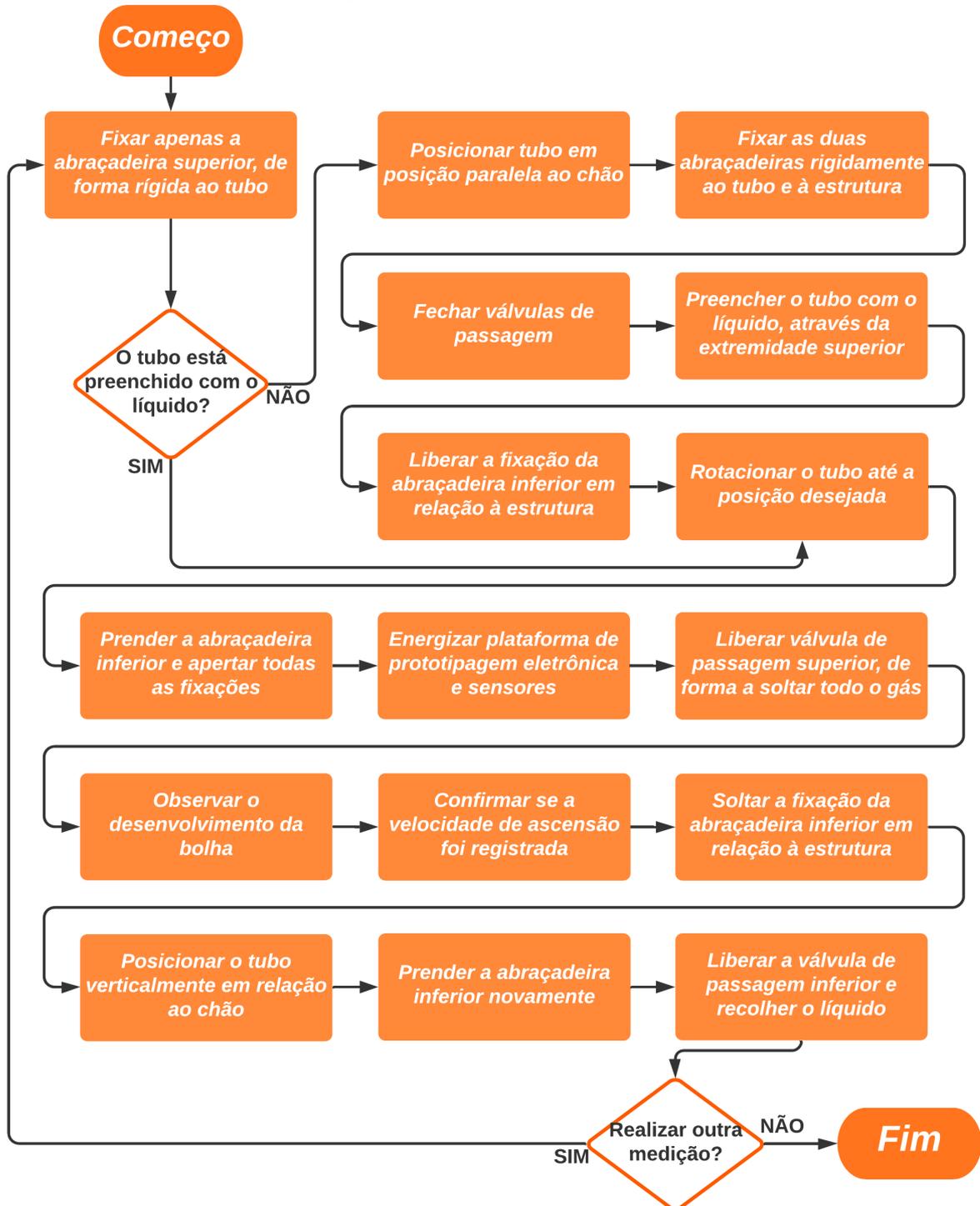
### 3.2.1 Projeto de Sensores de Medição

A fim de garantir uma maior facilidade da realização de inúmeras medições em sequência, de forma rápida, com precisão e baixo custo, o aparato experimental desenvolvido nesse projeto poderá ser adaptado em trabalhos futuros para utilizar sensores de impedância. Este tipo de sensor é frequentemente utilizado na literatura na detecção da passagem de bolhas alongadas de gás, em virtude das distintas características de condutância dos meios (gás e líquido). Uma plataforma de prototipagem eletrônica deve ser programada para coletar os sinais dos sensores e, a partir do processamento desses sinais, deve iniciar e pausar um cronômetro relativo às frequências de aquisição desses sinais, determinando de forma indireta a velocidade da bolha alongada por meio do período registrado pelo cronômetro e da distância linear entre os sensores. A plataforma de prototipagem eletrônica poderá também ser programada para permitir o registro automático dos dados de velocidade e inclinação do tubo para cada medição realizada no sistema. O projeto e simulação desse tipo de sensor já está sendo realizado para sua futura construção e posterior instalação no aparato experimental (SEIFERT; LIMA, 2020a,b). Um desenho feito em aplicativo CAD mostrando o tubo, os dois sensores de impedância e a plataforma de prototipagem eletrônica pode ser visto no círculo que representa uma ampliação de imagem, na parte superior da Figura 4.

## 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Em cada bloco do Fluxograma 1 é descrita uma etapa do procedimento experimental, que deve ser seguido nas medições experimentais para a determinação da velocidade da bolha alongada.

Fluxograma 1 – Demonstrativo do procedimento experimental



Fonte: autoria própria (2021).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio do projeto e do procedimento, descritos no Capítulo 3, foi possível construir e operar o aparato experimental desenvolvido, que se encontra instalado no Laboratório Didático de Mecânica dos Fluidos (LabMF) do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) do Câmpus Ponta Grossa da UTFPR.

Os testes foram realizados no aparato experimental utilizando um tubo de acrílico transparente com diâmetro nominal de uma polegada e comprimento de 2 m, como descrito na lista de material da Seção 3.1.5. Água foi empregada como fluido de preenchimento (líquido estagnado), a fim de observar a ascensão de uma bolha alongada de ar. Cada teste foi filmado com uma câmera de telefone celular (1080p e 60 fps) e os tempos de ascensão das bolhas registrados por meio da análise e do processamento dos vídeos, conforme descrito na Seção 3.2. As velocidades médias de ascensão das bolhas foram determinadas em função dos intervalos de tempo registrados nos vídeos e da distância linear entre as marcações no tubo (0,5 m).

Na sequência, a Seção 4.1 apresenta os casos analisados no presente trabalho e a Seção 4.2 apresenta as comparações dos resultados obtidos nestes casos com dados experimentais da literatura.

### 4.1 CASOS ANALISADOS

Com o intuito de verificar os resultados obtidos a partir do aparato experimental, foram analisados dois casos (ou inclinações), conforme ilustrado nas Fotografias 3 e 4: na vertical ( $90^\circ$ ) e inclinado ( $45^\circ$ ), respectivamente. Para cada um desses casos foram realizados 10 testes, com a finalidade de se determinar valores médios e desvios padrões para cada um dos dois conjuntos de dados. Os vídeos de registro desses dois casos podem ser vistos a partir dos links disponíveis nos códigos QR (Resposta Rápida, do inglês *Quick Response*) das respectivas fotografias.

### 4.2 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A fim de validar os resultados obtidos experimentalmente no aparato desenvolvido, utilizaram-se valores de referência descritos na literatura. A Fotografia 5(a) e

Fotografia 3 – Procedimento operacional realizado no aparato experimental para o caso vertical (90°)



Fonte: autoria própria (2021).

Fotografia 4 – Procedimento operacional realizado no aparato experimental para o caso inclinado ( $45^\circ$ )



Fonte: autoria própria (2021).

a Fotografia 5(b) ilustram os vídeos filmados na seção de testes para os dois casos analisados: na vertical ( $90^\circ$ ) e inclinado ( $45^\circ$ ), respectivamente. Os vídeos de registro desses dois casos podem ser vistos a partir dos links disponíveis nos códigos QR das respectivas fotografias. Um fundo escuro foi colocado na seção de testes para ajudar na visualização da passagem da bolha alongada. Os intervalos de tempo de ascensão das bolhas alongadas foram obtidos a partir do processamento dos vídeos utilizando o aplicativo **Shotcut** [↗](#). Os cronômetros utilizados para medir os tempos de ascensão das bolhas estão localizados na região inferior direita dos vídeos.

**Fotografia 5 – Testes para determinação da velocidade de ascensão de uma bolha alongada de ar escoando em um tubo contendo um líquido estagnado (água)**



Fonte: autoria própria (2021).

É possível observar diferenças perceptíveis na forma da bolha para os casos vertical, Fotografia 5(a), e inclinado, Fotografia 5(b), já descritas em diversos trabalhos na

literatura (MANERI; ZUBER, 1974; COUËT; STRUMOLO, 1987; AZEVEDO; FACCINI; SU, 2020; CAZAREZ-CANDIA; BENÍTEZ-CENTENO, 2020; MASSOUD; XIAO; EL-GAMAL, 2020). Além disso, observa-se também a formação de bolhas dispersas na traseira da bolha alongada para o caso vertical, resultante do aumento da esteira de turbulência, provocada pelo filme de líquido descendente em torno da bolha, em balanço com efeitos gravitacional, de empuxo e de tensão superficial (WALLIS, 1969; FERNANDES; SEMIAT; DUKLER, 1983; TAITEL; BARNEA, 1990; FABRE; LINE, 1992; BONIZZI; ISSA, 2003).

A Tabela 3 mostra os valores de tempo ( $t$ ) de ascensão da bolha alongada de ar registrados na seção de testes do tubo, assim como os respectivos valores de velocidade média ( $V_T$ ) determinados para cada bolha alongada analisada nesse trabalho. Os testes de 1 a 10 correspondem ao caso vertical ( $90^\circ$ ) e os testes de 11 a 20 correspondem ao caso inclinado ( $45^\circ$ ).

**Tabela 3 – Dados experimentais obtidos no aparato desenvolvido**

Teste (#)	Inclinação, $\theta$ ( $^\circ$ )	Tempo, $t$ (s)	Velocidade média, $V_T$ (m/s)
1	90	2,91	0,172
2	90	2,91	0,172
3	90	2,94	0,170
4	90	2,91	0,172
5	90	2,88	0,174
6	90	2,94	0,170
7	90	2,91	0,172
8	90	2,91	0,172
9	90	2,88	0,174
10	90	2,91	0,172
11	45	2,04	0,245
12	45	2,04	0,245
13	45	2,04	0,245
14	45	2,07	0,242
15	45	2,04	0,245
16	45	2,04	0,245
17	45	2,01	0,249
18	45	2,04	0,245
19	45	2,04	0,245
20	45	2,04	0,245

Fonte: autoria própria (2021).

A Tabela 4 mostra os valores médios e os desvios padrões das velocidades médias ( $V_T$ ), assim como os números de Froude ( $Fr$ ), para os dois conjuntos de dados dos casos analisados: na vertical ( $90^\circ$ ) e inclinado ( $45^\circ$ ), respectivamente. O  $Fr$  é também utilizado nesta análise em virtude de que este é um parâmetro adimensional

diretamente relacionado com a velocidade da bolha alongada, sendo apresentado por diversos trabalhos da literatura para fins de comparação, conforme mostrado no Capítulo 2. Observa-se na Tabela 4 que o escoamento inclinado ( $45^\circ$ ) apresenta um maior valor de  $Fr$  do que o escoamento vertical ( $90^\circ$ ), em virtude das alterações do balanço entre as forças gravitacional, de tensão superficial e de atrito.

**Tabela 4 – Valores médios e desvios padrões das velocidades médias e números de Froude obtidos experimentalmente para os casos analisados**

Inclinação, $\theta$ ( $^\circ$ )	Valor médio de $V_T$ (m/s)	Desvio padrão de $V_T$ (m/s)	Número de Froude, $Fr$ (-)
90	0,172	0,001	0,344
45	0,245	0,002	0,491

Fonte: autoria própria (2021).

A Tabela 5 apresenta uma comparação entre os valores de  $Fr$  obtidos experimentalmente nesse trabalho, com os valores estimados pela correlação de Bendiksen (1984) e os valores experimentais obtidos por Gómez-Bueno (2010). Os pequenos desvios observados entre valores experimentais se justificam pelas diferenças nos métodos de determinação da velocidade de ascensão da bolha, que no trabalho do Gómez-Bueno (2010) foi feito por meio de sondas de impedância, enquanto que nesse trabalho a determinação se mostrou dependente da qualidade dos vídeos gravados, sendo que esses podem apresentar pequenos erros de paralaxe e variações na taxa de quadros por segundo.

**Tabela 5 – Comparação dos valores de números de Froude obtidos experimentalmente neste trabalho em relação a literatura**

$\theta$ ( $^\circ$ )	Este trabalho	Gómez-Bueno (2010)		Bendiksen (1984)	
	$Fr$	$Fr$	Desvio relativo (%)	$Fr$	Desvio relativo (%)
45	0,491	0,479	2,51	0,627	21,72
90	0,344	0,345	0,23	0,345	0,23

Fonte: autoria própria (2021).

Em comparação com as estimativas da correlação proposta por Bendiksen (1984), os resultados experimentais para o caso vertical ( $90^\circ$ ) apresentaram um desvio desprezível. Por outro lado, os resultados experimentais para o caso inclinado ( $45^\circ$ ) apresentaram um desvio considerável de 21,72%. O principal motivo dessa discrepância pode estar relacionado com o fato de que Bendiksen (1984) realizou experimentos apenas para escoamentos verticais ( $90^\circ$ ) e horizontais ( $0^\circ$ ), propondo uma correlação para escoamentos inclinados em função desses limites, ponderados pelo ângulo de inclinação, conforme a Equação (18). Outros trabalhos, como os de Weber, Alarie e

Ryan (1986) e Gómez-Bueno (2010) também concluíram que a correlação proposta por Bendiksen (1984) se mostra discrepante em relação a alguns resultados experimentais, exceto nos limites.

## 5 CONCLUSÕES

Com a finalidade de permitir a visualização e a determinação da velocidade de uma bolha alongada de gás escoando em um líquido estagnado, o projeto, o dimensionamento e a construção de um aparato experimental foi realizada de forma satisfatória neste trabalho. Com esse aparato, foi possível observar a dinâmica da bolha alongada e alguns efeitos relevantes, como a forma da bolha alongada e a formação de bolhas dispersas na cauda da mesma.

Dois conjuntos de testes experimentais foram conduzidos a fim de verificar a operacionalidade do aparato desenvolvido para duas inclinações distintas. Os resultados desses testes foram comparados com dados da literatura, apresentando satisfatória concordância, com desvios pouco significativos.

Além disso, foram desenvolvidas metodologias simplificadas para construção e operação do aparato, que se mostra de fácil construção, com baixo custo, simples manuseabilidade e funcional para diversas aplicações no estudo experimental de escoamentos tubulares, auxiliando na análise e compreensão de diversos fenômenos relacionados aos escoamentos gás-líquido.

Ainda que os objetivos propostos nesse trabalho tenham sido cumpridos, é possível observar alguns pontos para melhoria do aparato desenvolvido ou que podem ser explorados como temas para trabalhos futuros:

- Realizar experimentos para verificar os efeitos da geometria, do diâmetro e da inclinação do tubo, assim como das propriedades dos fluidos de trabalho, para fornecer informações relevantes do escoamento e permitir o desenvolvimento de correlações e/ou o aperfeiçoamento de modelos.
- Realizar adaptações no aparato desenvolvido para operar com o líquido escoando juntamente com o gás (sistema dinâmico), para observar e obter informações sobre a formação e o desenvolvimento dos diversos padrões de escoamento gás-líquido, por meio do projeto e instalação de diferentes tipos de misturadores.
- Utilizar sensores de impedância para a determinação da velocidade da bolha alongada, além da filmagem e posterior tratamento de vídeos, assim como estudar outros instrumentos e técnicas para determinação desta e de outras características destes tipos de escoamento.

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, M. B. de; FACCINI, J. L. H.; SU, J. Experimental study of single Taylor bubbles rising in vertical and slightly deviated circular tubes. **Experimental Thermal and Fluid Science**, Elsevier BV, v. 116, 110109:1–17, ago. 2020. ISSN 0894-1777. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110109.
- BENDIKSEN, K. H. An experimental investigation of the motion of long bubbles in inclined tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 10, n. 4, p. 467–483, ago. 1984. ISSN 0301-9322. DOI: 10.1016/0301-9322(84)90057-0.
- BONIZZI, M.; ISSA, R. I. A model for simulating gas bubble entrainment in two-phase horizontal slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 29, n. 11, p. 1685–1717, nov. 2003. ISSN 0301-9322. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2003.09.001.
- BRATLAND, O. **Pipe flow 2: multi-phase flow assurance**. [S.l.]: Dr Ove Bratland Systems Pte. Ltd., 2010. 354 p. Disponível em: <http://www.drbratland.com/>. Acesso em: 17 set. 2019.
- CAREW, P. S.; THOMAS, N. H.; JOHNSON, A. B. A physically based correlation for the effects of power law rheology and inclination on slug bubble rise velocity. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 21, n. 6, p. 1091–1106, nov. 1995. ISSN 0301-9322. DOI: 10.1016/0301-9322(95)00047-2.
- CAZAREZ-CANDIA, O.; BENÍTEZ-CENTENO, O. C. Comprehensive experimental study of liquid-slug length and Taylor-bubble velocity in slug flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier BV, v. 72, 101697:1–12, abr. 2020. ISSN 0955-5986. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101697.
- COUËT, B.; STRUMOLO, G. S. The effects of surface tension and tube inclination on a two-dimensional rising bubble. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press (CUP), v. 184, p. 1–14, nov. 1987. ISSN 0022-1120, 1469-7645. DOI: 10.1017/s0022112087002787.
- DAVIES, R. M.; TAYLOR, G. I. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes. **Proceedings of the Royal Society of London**, The Royal Society, v. 200, n. 1062, p. 375–390, 7 fev. 1950. ISSN 0080-4630, 2053-9169. DOI: 10.1098/rspa.1950.0023.
- FABRE, J.; LINE, A. Modeling of two-phase slug flow. **Annual Review of Fluid Mechanics**, Annual Reviews, v. 24, n. 1, p. 21–46, jan. 1992. ISSN 0066-4189, 1545-4479. DOI: 10.1146/annurev.fl.24.010192.000321.
- FERNANDES, R. C.; SEMIAT, R.; DUKLER, A. E. Hydrodynamic model for gas-liquid slug flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, Wiley, v. 29, n. 6, p. 981–989, nov. 1983. ISSN 0001-1541, 1547-5905. DOI: 10.1002/aic.690290617.

GOKCAL, B.; AL-SARKHI, A. S.; SARICA, C. Effects of high oil viscosity on drift velocity for horizontal and upward inclined pipes. **SPE Projects, Facilities & Construction**, Society of Petroleum Engineers (SPE), v. 4, n. 2, p. 32–40, jun. 2009. ISSN 1942-2431. DOI: 10.2118/115342-pa.

GÓMEZ-BUENO, L. G. **Estudo experimental de escoamentos líquido-gás intermitentes em tubulações inclinadas**. Fev. 2010. 151 f. Diss. (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Disponível em: <http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/263073>. Acesso em: 21 nov. 2019.

HASAN, A. R.; KABIR, C. S. Predicting multiphase flow behavior in a deviated well. **SPE Production Engineering**, Society of Petroleum Engineers (SPE), v. 3, n. 4, p. 474–482, 1 nov. 1988. ISSN 0885-9221. DOI: 10.2118/15449-pa.

HAYASHI, K.; KURIMOTO, R.; TOMIYAMA, A. Dimensional analysis of terminal velocity of a Taylor bubble in a vertical pipe. **Multiphase Science and Technology**, Begell House, v. 22, n. 3, p. 197–210, 2010. ISSN 0276-1459. DOI: 10.1615/multscientechn.v22.i3.20.

HOUT, R. van; BARNEA, D.; SHEMER, L. Translational velocities of elongated bubbles in continuous slug flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 28, n. 8, p. 1333–1350, ago. 2002. ISSN 0301-9322. DOI: 10.1016/S0301-9322(02)00027-7.

JEYACHANDRA, B. C. et al. Drift-velocity closure relationships for slug two-phase high-viscosity oil flow in pipes. **SPE Journal**, Society of Petroleum Engineers (SPE), v. 17, n. 2, p. 593–601, jun. 2012. ISSN 1086-055X, 1930-0220. DOI: 10.2118/151616-pa.

LIMA, L. E. M. **Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido**. Jul. 2011. 147 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/264105>. Acesso em: 3 jul. 2019.

LIZARRAGA-GARCIA, E.; BUONGIORNO, J.; BUCCI, M. An analytical film drainage model and breakup criterion for Taylor bubbles in slug flow in inclined round pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 84, p. 46–53, set. 2016. ISSN 0301-9322. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.03.020.

MANERI, C. C.; ZUBER, N. An experimental study of plane bubbles rising at inclination. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 1, n. 5, p. 623–645, nov. 1974. ISSN 0301-9322. DOI: 10.1016/0301-9322(74)90022-6.

MASSOUD, E. Z.; XIAO, Q.; EL-GAMAL, H. A. Numerical study of an individual Taylor bubble drifting through stagnant liquid in an inclined pipe. **Ocean Engineering**,

Elsevier BV, v. 195, 106648:1–20, jan. 2020. ISSN 0029-8018. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106648.

MOREIRAS, J. et al. Unified drift velocity closure relationship for large bubbles rising in stagnant viscous fluids in pipes. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Elsevier BV, v. 124, p. 359–366, dez. 2014. ISSN 0920-4105. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.09.006.

NICKLIN, D. J.; WILKES, J. O.; DAVIDSON, J. F. Two-phase flow in vertical tubes. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 40, p. 61–68, 1962. ISSN 0046-9858, 0371-7496.

POLONSKY, S.; SHEMER, L.; BARNEA, D. The relation between the Taylor bubble motion and the velocity field ahead of it. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 25, n. 6–7, p. 957–975, set. 1999. ISSN 0301-9322. DOI: 10.1016/s0301-9322(99)00037-3.

ROCHA, A. D.; ROSA, E. S. Ascensão de uma bolha de ar em tubo vertical em líquido estacionário: análise experimental. In: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ (PUCPR), Curitiba, PR, Brazil. PROCEEDINGS of the 11<sup>th</sup> Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT). Rio de Janeiro, RJ, Brazil: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), dez. 2006. (Multiphase Systems), 331:1–10. Paper ID: CIT06-0331. Disponível em: <https://abcm.org.br/app/webroot/anais/encit/2006/arquivos/Multiphase%20Systems/CIT06-0331.pdf>. Acesso em: 15 mai. 2020.

SALAU, S. **Govt plans independent ownership of oil pipelines**: commences arrangement to legalize illegal refineries. [S.l.: s.n.], 24 mar. 2016. Disponível em: <https://guardian.ng/business-services/govt-plans-independent-ownership-of-oil-pipelines/>. Acesso em: 6 ago. 2019.

SEIFERT, A.; LIMA, L. E. M. **Desenvolvimento de um sensor para medição da velocidade de uma bolha de gás em um líquido estagnado**. Ponta Grossa, PR, Brasil, jul. 2020. 18 p. Relatório Final do Programa de Voluntariado em Iniciação Científica e Tecnológica (Edital PROPPG 04/2019 — PIVICT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

SEIFERT, A.; LIMA, L. E. M. Desenvolvimento de um sensor para medição da velocidade de uma bolha de gás em um líquido estagnado. In: UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ (UTFPR), Toledo, PR, Brasil. ANAIS do XXV Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR (SICITE). Curitiba, PR, Brasil: Editora UTFPR, nov. 2020. (Engenharia Elétrica), 7159:1–8. Paper ID: SICITE2020-7159. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2020/paper/view/7159>. Acesso em: 15 dez. 2020.

SHOHAM, O. **Mechanistic modeling of gas-liquid two-phase flow in pipes**. Richardson, TX, USA: Society of Petroleum Engineers (SPE), 2006. 396 p. ISBN 9781555631079.

SHOSHO, C. E.; RYAN, M. E. An experimental study of the motion of long bubbles in inclined tubes. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 56, n. 6, p. 2191–2204, mar. 2001. ISSN 0009-2509. DOI: 10.1016/s0009-2509(00)00504-2.

SPEEDING, P. L.; NGUYEN, V. T. Bubble rise and liquid content in horizontal and inclined tubes. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 33, n. 8, p. 987–994, 1978. ISSN 0009-2509. DOI: 10.1016/0009-2509(78)85001-5.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. Two-phase slug flow. In: HARTNETT, J. P.; IRVINE JR., T. F. (Ed.). **Advances in Heat Transfer**. [S.l.]: Elsevier, 1990. v. 20. p. 83–132. DOI: 10.1016/s0065-2717(08)70026-1.

VINHAS, P. A. M. **Estudo do movimento da bolha de Taylor em coluna vertical e ligeiramente inclinável de líquido estagnado utilizando uma técnica de visualização**. Fev. 2015. 104 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Nuclear) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: <http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10013780.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2020.

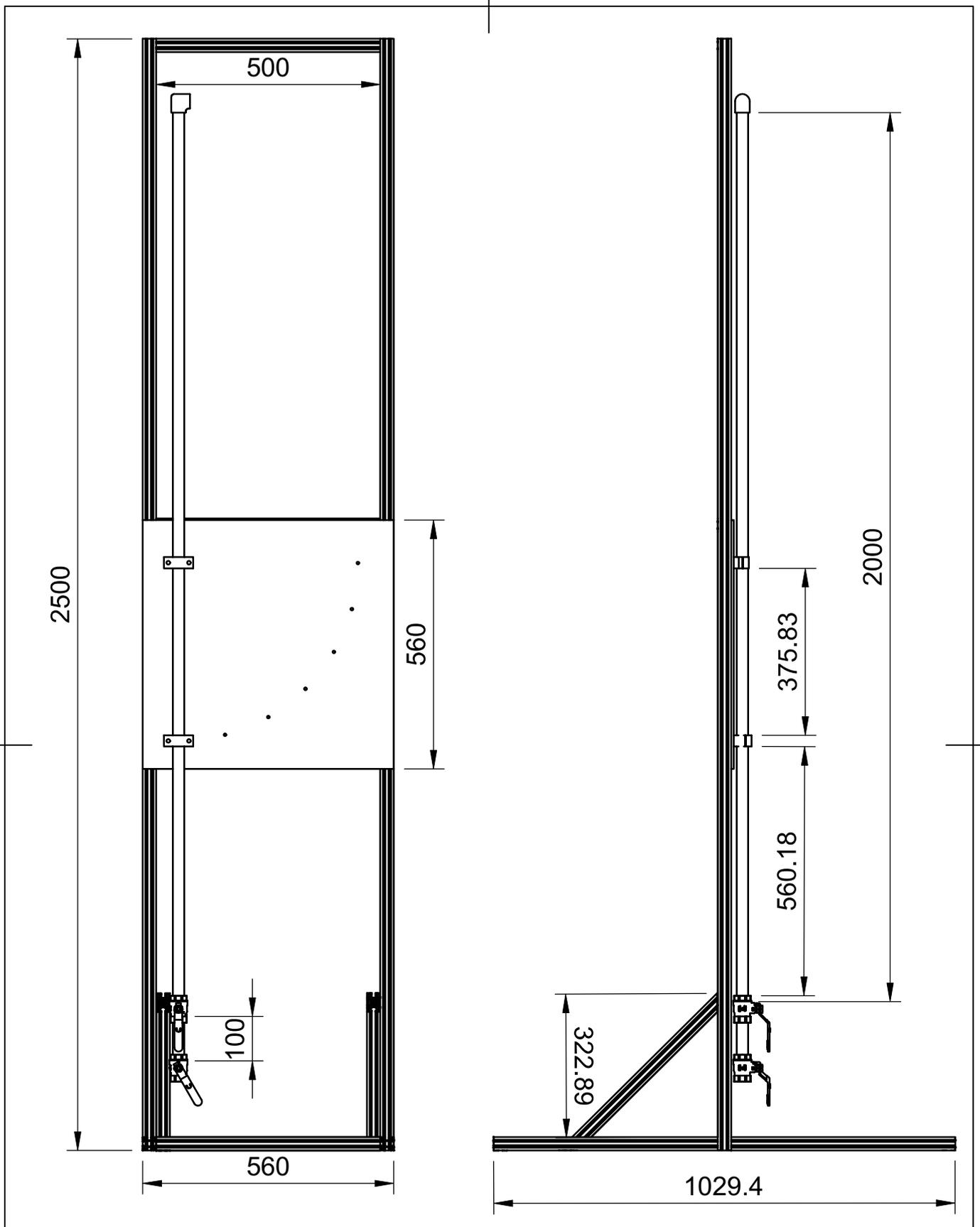
WALLIS, G. B. **One-dimensional two-phase flow**. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1969. 408 p. ISBN 9780070679429.

WEBER, M. E.; ALARIE, A.; RYAN, M. E. Velocities of extended bubbles in inclined tubes. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 41, n. 9, p. 2235–2240, 1986. ISSN 0009-2509. DOI: 10.1016/0009-2509(86)85073-4.

WEISMAN, J.; KANG, S. Y. Flow pattern transitions in vertical and upwardly inclined lines. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 7, n. 3, p. 271–291, jun. 1981. ISSN 0301-9322. DOI: 10.1016/0301-9322(81)90022-7.

ZUKOSKI, E. E. Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. **Journal of Fluid Mechanics**, Cambridge University Press (CUP), v. 25, n. 4, p. 821–837, ago. 1966. ISSN 0022-1120, 1469-7645. DOI: 10.1017/s0022112066000442.

**APÊNDICE A — VISTAS FRONTAL E LATERAL DO APARATO EXPERIMENTAL**



Departamento  
Acadêmico de  
Mecânica



Created by

André Vinícius Segall Ando

Title

Vistas Frontal e Lateral do  
Aparato Experimental

Scale

1 : 12

Date:

11 / 03 / 2021