

GLÁUCIO KENJI MATOBA

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO  
ESCOAMENTO VERTICAL ASCENDENTE BIFÁSICO  
AR-ÁGUA NO PADRÃO BOLHAS

DISSERTAÇÃO

BRAGANÇA

2019

GLÁUCIO KENJI MATOBA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO  
ESCOAMENTO VERTICAL ASCENDENTE BIFÁSICO  
AR-ÁGUA NO PADRÃO BOLHAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Dupla  
Diplomação entre a Universidade Tecnológica Fe-  
deral do Paraná e o Instituto Politécnico de Bra-  
gança, como requisito para a obtenção do título  
de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Luís Frólén Ribeiro

Co-orientador: Valdemar Garcia  
Fábio Suguimoto

**BRAGANÇA**

**2019**

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, meu irmão e a todos os meus amigos que me ajudaram a realizar este sonho.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pelas bênçãos em minha vida. Aos meus pais e meu irmão que sempre me apoiaram e me estimularam para não perder o foco e celebrar cada conquista.

Minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof<sup>o</sup> Doutor Luis Frólén Ribeiro do Instituto Politécnico de Bragança e ao meu co-orientador Prof<sup>o</sup> Doutor Fábio Kenji Suguimoto da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - campus Cornélio Procópio, pela ajuda desde os ensinamentos da mecânica dos fluidos, até a escrita desta dissertação. Agradeço imensamente ao meu co-orientador Prof<sup>o</sup> Doutor Valdemar Garcia do Instituto Politécnico de Bragança, pelo apoio em todos os passos deste trabalho, sempre estava disposto para me ajudar, mesmo em feriados, pelo conhecimento transmitido de forma simples e prática e pela amizade cultivada. Muito obrigado.

Agradeço também aos técnicos do Laboratório de Geotecnia, João Pires e Otávio Pereira, pelas dicas e auxílio na construção da plataforma. Agradeço aos técnicos Jorge Paulo e Abílio do Laboratório de mecânica, pela ajuda na fabricação das peças e manuseio das máquinas de usinagem. E também agradeço a Eng<sup>a</sup> Hermínia pela ajuda na aquisição dos materiais da instalação experimental. Agradeço também aos meus amigos, em especial, Leonam Akira Ferreira da Costa pela ajuda nas simulações numéricas no *software* ANSYS<sup>®</sup> e ao meu companheiro de laboratório Samuel dos Santos, pelo auxílio no manuseio da instalação experimental.

Devo também agradecer ao Instituto Politécnico de Bragança por disponibilizar espaço e materiais necessários, juntamente com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná por proporcionar este intercâmbio.

Por fim, agradeço imensamente aos meus amigos do IPB e da UTFPR, especialmente, o Jean Hilário, Arthur Casarini, Luiz Miguel, Ricardo Williams, Guilherme Irigoyen e Isabelle Corrêia que me ajudaram desde o começo deste intercâmbio até a parte prática desta dissertação.

”If I had 8 hours to chop down a tree, I would spend 6 of those hours sharpening my axe.”

Abraham Lincoln

## RESUMO

MATOBA, Gláucio Kenji. ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ESCOAMENTO VERTICAL ASCENDENTE BIFÁSICO AR-ÁGUA NO PADRÃO BOLHAS. 29 f. Dissertação – Programa de Dupla Diplomação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2019.

O estudo apresentado nesta dissertação de mestrado é constituído por 2 partes principais: a primeira onde se apresenta uma instalação experimental e o estudo experimental e numérico efetuado; a segunda parte se apresenta o dimensionamento e instalação de uma plataforma metálica que permite a utilização segura do equipamento para escoamentos bifásicos.

A instalação experimental permite várias configurações e regimes de escoamentos gás-líquido. Este tipo de escoamento bifásico pode ser encontrado em várias áreas da indústria química, nuclear, petrolífera, entre outros. Neste trabalho, estudou-se apenas o sistema ar-água em regime *Bubble flow* e em modo co-corrente, ascendente e vertical, este tipo de regime de escoamento pode ser encontrado em oxigenação da água, bombas de *gas-lift* e borbulhadores. Os parâmetros estudados foram o gradiente de pressão e a fração de vazio. Realizaram-se 30 testes experimentais e seus respectivos numéricos com 6 velocidades superficiais de líquido variando entre  $1,727 \times 10^{-2}$  m/s e  $10,360 \times 10^{-2}$  m/s, com 5 velocidades superficiais de gás variando entre  $1,243 \times 10^{-2}$  m/s e  $2,072 \times 10^{-2}$  m/s. A tubagem de acrílico utilizada tem um diâmetro interno de 0,032 m e um comprimento de 3,56 m. O modelo numérico, que é baseado no modelo de mistura, foi implementado no *software* MATLAB<sup>®</sup>, tendo se efetuado as simulações para as mesmas condições experimentais a fim de comparar os resultados. A comparação entre os resultados numéricos e experimentais da fração de vazio apresentou um desvio abaixo dos 15% para ambos os métodos experimentais: *fecho síncrono das válvulas* e *relação de Zuber/Nicklin*. E a comparação para o gradiente de pressão resultou em um desvio relativo abaixo dos 2%.

Realizou-se também o projeto de adaptação e instalação de uma plataforma metálica para auxiliar o manuseio seguro do equipamento para escoamentos bifásicos. As alterações realizadas na plataforma foram: corte no piso, nas colunas, na escada e a modificação nos suportes de fixação com a parede. Estas alterações foram necessárias, pois o novo local de instalação da plataforma tem uma configuração diferente do antigo local. Realizou-se os estudos das tensões e deformações máximas através dos métodos de elementos finitos com o auxílio do *software* ANSYS<sup>®</sup> com o intuito de validar as alterações realizadas. O deslocamento máximo encontrado no piso da plataforma foi de 3,37 mm com uma carga estática distribuída de 300 kg. Instalou-se a plataforma metálica no Laboratório de mecânica de fluidos e hidráulica. Essa plataforma, corretamente dimensionada, permitiu a instalação segura do equipamento de escoamento bifásico e o seu posterior manuseio seguro.

**Palavras-chave:** Escoamento bifásico, modelo de mistura, gradiente de pressão, ins-

talação experimental, análise estrutural.

## ABSTRACT

MATOBA, Gláucio Kenji. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF A TWO-PHASE UPWARD VERTICAL FLOW AIR-WATER. 29 f. Dissertação – Programa de Dupla Diplomação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná Instituto Politécnico de Bragança. Bragança, 2019.

The presented study in this master's thesis consists of two main parts: the first one where an experimental installation is presented and an experimental and numerical study carried out; the second part presents the dimensioning of a metal platform installation that allows the safe use of equipment for gas-liquid flow.

The experimental setup allows for various configurations and gas-liquid flow regimes. In this work, only the air-water system was studied in the Bubble flow regime and in co-current, ascending and vertical mode. The parameters studied were the pressure gradient and the void fraction. 30 experimental and numerical tests were carried out with 6 superficial liquid velocities ranging from  $1.722 \times 10^{-2}$  m/s to  $10.360 \times 10^{-2}$  m/s with 5 superficial gas velocities ranging from  $1.243 \times 10^{-2}$  m/s and  $2.072 \times 10^{-2}$  m/s. The acrylic pipe used has an inner diameter of 0.032 m and a length of 3.56 m. The numerical model that is based on the mixture model, implemented in MATLAB<sup>®</sup> software, was carried out simulations for the same experimental conditions to compare the results. The comparison between the numerical and experimental results of the void fraction showed an error below 15% for both experimental methods: *quick-closing valves method* and *Zuber/Nicklin relation*. And the comparison for the pressure gradient resulted in a relative error below 2%.

The adjustments and installation project of a metal platform was also carried out to assist the safe handling of the apparatus/installation of biphasic flows experiment. The main alterations made in the platform were: cut in the floor, in the columns, in the stairs and the modification in the fixed supports with the wall. These changes were necessary because the new platform installation location has a different configuration from the old location. The maximum tensile and deformation studies were carried out using finite element methods with ANSYS<sup>®</sup> software in order to validate the changes made. The maximum displacement found on the platform floor was 3.37mm with a static load distributed of 300 kg. The metal platform was installed in the laboratory of fluid mechanics and hydraulics at IPB. This platform, properly dimensioned, allowed the safe installation of the biphasic flow apparatus and its subsequent safe handling.

**Keywords:** two-phase flow, mixture model, pressure gradient, two-phase flow experimental apparatus, static structural analysis.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>PREFÁCIO</b> .....	<b>16</b>
<b>I</b>	<b>Escoamento bifásico</b>	<b>17</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	APLICAÇÕES DO ESCOAMENTO BIFÁSICO .....	1
1.2	ESTRUTURA DA PARTE I .....	2
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>4</b>
2.1	VELOCIDADE DE SUBIDA DAS BOLHAS .....	5
2.2	FRAÇÕES DE VAZIO E DE LÍQUIDO .....	5
2.3	GRADIENTE DE PRESSÃO .....	6
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>8</b>
3.1	ESCOAMENTOS BIFÁSICOS .....	8
3.2	PADRÕES DE ESCOAMENTO .....	8
3.3	MÉTODOS DE ANÁLISE .....	10
3.4	MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4ª ORDEM .....	10
3.5	MÉTODO DA SECANTE .....	12
3.6	MÉTODO RK-4 IMPLÍCITO .....	12
3.7	VARIÁVEIS RELACIONADAS AO ESCOAMENTO BIFÁSICO .....	13
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
4.1	INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAIS .....	16
4.1.1	Gradiente de Pressão experimental .....	20
4.1.2	Fração de vazio experimental .....	20
4.1.3	Análise de incerteza .....	22
4.2	PROCEDIMENTO NUMÉRICO .....	23
4.2.1	Modelo de mistura .....	23
4.2.2	Mapa dos Padrões de escoamento .....	25
4.2.3	Fração de Vazio .....	27
4.2.4	Modelo de força de atrito .....	28
4.2.5	Solução do Modelo de Mistura .....	28
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>31</b>
5.1	MAPA DE PADRÕES DE ESCOAMENTO .....	31
5.2	FRAÇÃO DE VAZIO .....	33
5.3	GRADIENTE DE PRESSÃO .....	37
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>40</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	40
6.2	TRABALHOS FUTUROS E MELHORAS NA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL .....	41

<b>II</b>	<b>Plataforma Metálica</b>	<b>43</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS	1
1.2	HISTÓRICO DA PLATAFORMA	1
1.3	ESTRUTURA DA PARTE II	2
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>3</b>
2.1	ANÁLISE ESTRUTURAL	3
2.2	MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS	4
2.3	A GEOMETRIA E MALHA DOS COMPONENTES	6
2.4	MATERIAL DOS COMPONENTES	7
2.5	COEFICIENTES DE SEGURANÇA E NORMAS DE PROJETO	7
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>9</b>
3.1	SITUAÇÃO PRÉVIA	9
3.2	CONSIDERAÇÕES DO PROJETO	9
3.3	MATERIAIS	10
3.4	ANÁLISE ESTRUTURAL - ANSYS®	10
3.4.1	Malha	11
3.4.2	Contactos	13
3.4.3	Pré-análise - carregamento externo dos parafusos	15
3.4.4	Condições de contorno	16
3.4.5	Procedimento de análise	17
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>18</b>
4.1	TENSÕES DE VON-MISES	21
4.2	DESLOCAMENTO	24
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>25</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>26</b>

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1–	Características dos materiais dos componentes da plataforma. ....	10
TABELA 3.2–	Descrição e tamanho dos elementos da malha. ....	12
TABELA 3.3–	Forças de reação nos elementos de viga. ....	15

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1– Representação dos quatro principais padrões de escoamento gás-líquido vertical ascendente. ....	9
FIGURA 3.2– Representação gráfica das estimativas de inclinação do método RK de quarta ordem. ....	11
FIGURA 3.3– Representação gráfica do método da secante. ....	12
FIGURA 4.1– (a) Representação esquemática da instalação experimental, (b) Aparato experimental, (c) Escoamento experimental no regime Bolhas. ....	16
FIGURA 4.2– Rotâmetro para medição do caudal de água, R1 da esquerda e R2 da direita. ....	17
FIGURA 4.3– (a) Rotâmetro de ar (R3), (b) Reservatório de segurança. ....	18
FIGURA 4.4– Injetor de difusão LGI. (a) Desenho esquemático, (b) Injetor de difusão. ....	18
FIGURA 4.5– Representação esquemática do manómetro diferencial - princípio de funcionamento. ....	21
FIGURA 4.6– Mapa dos padrões de escoamento ar-água ascendente vertical para uma tubagem de 50mm de diâmetro. ....	26
FIGURA 4.7– Fluxograma da solução do modelo de mistura. ....	29
FIGURA 5.1– Mapa dos padrões de escoamento para um sistema ar-água em escoamento vertical ascendente num tubo com 32mm de diâmetro e localização dos pontos experimentais testados. ....	31
FIGURA 5.2– Padrões de escoamento obtidos na instalação experimental, para um escoamento ar-água ascendente vertical. (a) Bolhas - <i>Bubble Flow</i> , (b) Golfadas - <i>Slug Flow</i> , (c) Esfarrapado - <i>Churn flow</i> e (d) Anular - <i>Annular flow</i> . ....	32
FIGURA 5.3– Resultado experimental da fração de vazio para todas as velocidades $J_L$ e $J_G$ testadas - Método do <i>fecho síncrono das válvulas</i> . ....	33
FIGURA 5.4– Resultado experimental da fração de vazio para todas as velocidades $J_L$ e $J_G$ testadas - Método da <i>relação de Zuber/Nicklin</i> . ....	34
FIGURA 5.5– Resultados para os erros relativos para todos os $J_L$ testado - Método do <i>fecho síncrono das válvulas</i> ....	35
FIGURA 5.6– Comparação da fração de vazio, $\alpha$ , para os resultados experimentais (eixo-Y) contra os resultados numéricos (eixo-X), as linhas pontilhadas vermelhas correspondem um máximo e mínimo de 15% dos erros experimentais - Método do <i>fecho síncrono das válvulas</i> ....	35
FIGURA 5.7– Resultados para os erros relativos para todos os $J_L$ e $J_G$ testados - Método da <i>relação de Zuber/Nicklin</i> . ....	36
FIGURA 5.8– Resultados da velocidade de subida das bolhas em meio estagnado de água, $V_{\infty,B}$ , utilizado no método da <i>relação de Zuber/Nicklin</i> . ....	36
FIGURA 5.9– Comparação da fração de vazio, $\alpha$ , para os resultados experimentais (eixo-Y) contra os resultados numéricos (eixo-X), as linhas pontilhadas vermelhas correspondem um máximo e mínimo de 15% dos erros	

experimentais - Método da <i>relação Zuber/Nickilin</i> . . . . .	37
FIGURA 5.10 Gradiente de pressão Experimental vs Numérico. . . . .	38
FIGURA 5.11 Erro relativo do gradiente de pressão. . . . .	39
FIGURA 5.12 Comparação do gradiente de pressão $\Delta P/L$ para os resultados experimentais (y-axis) contra os resultados numéricos (x-axis), as linhas pontilhadas vermelhas correspondem um máximo e mínimo de 2% dos erros experimentais. . . . .	39
FIGURA 2.1- Similaridade entre um elemento e uma mola carregados axialmente. . . . .	4
FIGURA 2.2- Deslocamento e forças nas extremidades de uma mola. . . . .	5
FIGURA 2.3- Dois elementos ou molas de série com rigidez, deslocamentos e forças diferentes. . . . .	5
FIGURA 3.1- Modelo 3D da plataforma no ANSYS®. . . . .	11
FIGURA 3.2- Modelo 3D da plataforma no novo local de instalação. . . . .	11
FIGURA 3.3- Perspetiva da plataforma com pormenores da malha no Piso da plataforma (1), colunas (2) e escadas (3). . . . .	12
FIGURA 3.4- Malha detalhada e refinada nos suportes 1 e 2, respectivamente elementos constituintes da plataforma nº4 e 5. . . . .	12
FIGURA 3.5- Contactos do tipo <i>Bonded</i> - Suporte 1. . . . .	13
FIGURA 3.6- Contactos do tipo <i>Bonded</i> - Suporte 2. . . . .	13
FIGURA 3.7- contactos do tipo <i>Friction</i> - Suporte 1. . . . .	14
FIGURA 3.8- contactos do tipo <i>Friction</i> - Suporte 2. . . . .	14
FIGURA 3.9- Elementos de viga. . . . .	15
FIGURA 3.10 Condição <i>Fixed Support</i> . . . . .	16
FIGURA 3.11 Pré-carga nos Parafusos. . . . .	17
FIGURA 3.12 Cargas aplicadas. . . . .	17
FIGURA 4.1- Modelo 3D do local de implantação da plataforma. . . . .	18
FIGURA 4.2- Tensão de von-Mises antes da viga quadrada. . . . .	19
FIGURA 4.3- Viga quadrada modelo e na instalação. . . . .	19
FIGURA 4.4- Soluções do suporte 1. . . . .	20
FIGURA 4.5- Solução (e) escolhida - Comparação suporte modelo VS real. . . . .	20
FIGURA 4.6- Distribuição da tensão de von Mises. . . . .	21
FIGURA 4.7- Distribuição da tensão de von Mises no parafuso. . . . .	22
FIGURA 4.8- Distribuição da tensão de von Mises no suporte 1. . . . .	22
FIGURA 4.9- Distribuição da tensão de von Mises no suporte 2. . . . .	23
FIGURA 4.10 Suporte 2 modelo e sua montagem final. . . . .	23
FIGURA 4.11 Distribuição da tensão de von Mises no piso da plataforma. . . . .	23
FIGURA 4.12 Deslocamento máximo (Ampliado 59x). . . . .	24
FIGURA 4.13 Plataforma final instalada sem e com carga. . . . .	24

## LISTA DE SIGLAS

RK-4	Método de Runge-Kutta de 4ª ordem
LMCM	Laboratório de Materiais de Construção Mecânica
LMFH	Laboratório de Mecânica de Fluidos e Hidráulica
MEF	Método de Elementos Finitos
IPB	Instituto Politécnico de Bragança

## Lista de Símbolos

Símbolo Gregos	Descrição	Unidade
$\alpha$	Fração volumétrica de gás	[%]
$\varepsilon$	Rugosidade da tubagem	[m]
$\Gamma$	Vazão mássica por unidade de volume devido à mudança de fase	[kg/m <sup>3</sup> s]
$\nu$	Coefficiente de Poisson	[-]
$\Psi$	Variável auxiliar	[-]
$\rho$	Massa volúmica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Tensão superficial	[N/m]
$\tau_W$	Tensão de corte da mistura	[Pa]
$\tau_{W,S}$	Força de atrito na parede	[Pa/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	Ângulo de inclinação da tubagem	[°]

Símbolos Latinos	Descrição	Unidade
$A$	Área da secção transversal	[m <sup>2</sup> ]
$C_{0,B}$	Parâmetro de distribuição das bolhas	[-]
$C_f$	Coefficiente de atrito	[-]
$C_B$	Coefficiente de covariância da velocidade	[-]
$D$	Diâmetro interno da tubagem	[m]
$E$	Módulo de Young ou Módulo de elasticidade	[Pa]
$E_0$	Número de Eötvös	[-]
$f$	Fator de atrito	[-]
$G$	Fluxo mássico da fase	[kg/m <sup>2</sup> s]
$g$	Aceleração da gravidade	[m/s <sup>2</sup> ]
$J$	Velocidade superficial da fase	[m/s]
$L$	Distância entre as tomas de pressão P1 e P2	[m]

$L_v$	Distância entre as válvulas de fecho síncrono V1 e V2	[m]
$L_{V_{\infty B}}$	Distância entre a toma de pressão P1 e a válvula V1	[m]
$P$	Pressão da mistura	[Pa]
$Q$	Vazão volumétrica	[m <sup>3</sup> /s]
$R_{esp}$	Constante específica do gás ideal	[J/kg K]
$R_S$	Fração volumétrica de líquido	[%]
$S$	Perímetro interno da tubagem	[m]
$S_y$	Limite de escoamento	[MPa]
$T$	Temperatura do escoamento	[K]
$U$	Velocidade real da mistura	[m/s]
$V_{G,J}$	Velocidade de deslizamento média	[m/s]
$V_{\infty,B}$	Velocidade terminal de subida das bolhas	[m/s]
$z$	Coordenada axial	[m]

<b>Subscritos</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
0	Referência ou inicial	[-]
$G$	Gás	[-]
$k$	Fase	[-]
$L$	Líquido	[-]
$S$	Mistura	[-]

## 1 PREFÁCIO

Esta dissertação está dividida em duas partes principais:

**Parte I** Escoamento bifásico;

**Parte II** Plataforma metálica.

A Parte I desta dissertação é a principal, onde se trata do estudo dos escoamentos bifásicos, uma análise experimental e numérica. Nesta parte, é mostrada a instalação experimental montada, os equipamentos e as técnicas de medição e também o método numérico utilizado. Os resultados numéricos e experimentais da fração de vazio e do gradiente de pressão são comparados, sendo avaliados os valores de desvios relativos entre estes resultados.

Na Parte II, descreve-se o projeto de adaptação e a instalação de uma plataforma metálica recuperada. Realizou-se também uma análise numérica, utilizando o método de elementos finitos para validar as alterações necessárias. O intuito desta plataforma é auxiliar o manuseio seguro da instalação experimental, descrita na Parte I.

As Partes I e II desta dissertação são distintas, cada uma delas tendo sua própria introdução, fundamentação teórica, materiais e métodos, resultados e discussões e por fim as conclusões. As referências estão todas juntas, mostradas no último tópico.

Uma observação, esta dissertação está escrita em português europeu. Algumas palavras são diferentes, porém com o mesmo significado com o português brasileiro. Por exemplo: limite de cedência = limite de escoamento; ruína = falha; tubagem = tubulação; fração de vazio = retenção de gás; massa volúmica = massa específica; vazão = caudal; empuxo = impulsão e fecho = fechamento.

## **PARTE I**

# **ESCOAMENTO BIFÁSICO**

## 1 INTRODUÇÃO

Estudou-se o escoamento ascendente de ar e água em regime permanente, unidimensional numa tubagem vertical com diâmetro constante. Existem 4 principais padrões ou regimes de escoamentos (Taitel et al. 1980): *Bubble flow* (Bolhas), *Slug flow* (Golfadas), *Churn flow* (Esfarrapado) e *Annular flow* (Anular). Neste trabalho, foi estudado duas características do padrão de escoamento *Bubble flow*: a fração de vazio,  $\alpha$ , e o gradiente de pressão,  $\Delta P/L$ . Os resultados numéricos e experimentais foram comparados entre si para validar o modelo numérico.

### 1.1 APLICAÇÕES DO ESCOAMENTO BIFÁSICO

O escoamento bifásico pode ser encontrado em várias áreas da indústria. Por exemplo, nas indústrias de petróleo, química, nuclear, espacial, tratamento de água, entre outros. Com estas aplicações industriais, gerou-se a necessidade de desenvolver métodos para descrever o comportamento deste escoamento. Sendo assim, muitos estudos são desenvolvidos nesta área desde de 1950.

O escoamento bifásico ocorre na indústria petrolífera durando os processos de produção e de transporte de óleo e de gás. O escoamento bifásico ocorre na horizontal, na vertical e em tubagens inclinadas. Essas tubagens são geralmente compridas, por exemplo na produção *offshore* em alto mar até chegarem nas refinarias. Muitos componentes da tubagem e separadores são utilizados para controlar o fluxo do escoamento. Portanto, é necessário o desenvolvimento de métodos para determinar o gradiente de pressão e a fração de vazio, ou fração de líquido, para dimensionar corretamente as tubagens e as instalações da refinaria (Shoham 2005). Na industria nuclear, o escoamento bifásico é considerado principalmente para condições de segurança. Quando ocorre um acidente do tipo *Loss of Coolant Accident* (LOCA), ou seja, quando ocorre um erro do sistema de arrefecimento, imediatamente injeta-se água para arrefecer o núcleo, gerando um escoamento bifásico. Este processo deve ser cuidadosamente analisado para prevenir um

possível acidente nuclear ou até mesmo a fusão do núcleo descontrolado.

Outra aplicação dos escoamentos bifásicos é na oxigenação da água, na qual é importante para o tratamento de águas residuais e também na piscicultura/aquacultura. No tratamento de água residuais, a oxigenação evita o desenvolvimento de bactérias anaeróbicas. Estas bactérias anaeróbicas utilizam o oxigênio presentes em restos orgânicos (na falta do oxigênio da água) dos efluentes, decompondo o material orgânico em compostos de odor desagradável (esgoto). Já na piscicultura, a oxigenação da água permite desencadear uma série de acontecimentos que vão resultar em um ambiente mais saudável e equilibrado para os peixes, a falta de oxigênio para os peixes ocasiona estresse e estes param ou reduzem o consumo de ração, baixa no sistema imunológico e ficam mais suscetíveis a doenças e, conseqüentemente, pode resultar em mortalidades.

Outra aplicação dos escoamentos bifásicos é o estudo de bombas *gas-lift*. As bombas do tipo *gas-lift* apresentam algumas vantagens em relação aos outros tipos de bombas mecânica pois, não possuem partes móveis, não necessitam de lubrificação e não sofrem com problemas de desgastes, ou seja, não requerem muita manutenção. Além disso, as bombas do tipo *gas-lift* podem bombear substâncias tóxicas e/ou corrosivas, nas indústrias químicas, água salgada e líquidos viscosos como os óleos, na indústria petrolífera (Hanafizadeh et al. 2011). As bombas do tipo *gas-lift* estão em crescimento quando sua utilização depende apenas de ar comprimido como um recurso de energia renovável para aplicações de bombeamento de água (Kassab et al. 2009).

## 1.2 ESTRUTURA DA PARTE I

A Parte I desta dissertação está dividida em 6 capítulos:

Este primeiro capítulo é composto pela introdução ao tema dos escoamentos bifásicos e um breve comentário sobre as aplicações destes escoamento na indústria.

O segundo capítulo é o estado da arte, onde são apresentados os parâmetros/caraterísticas dos escoamentos bifásicos e as possíveis áreas de estudo. Em seguida, apresenta-se uma revisão sucinta sobre os parâmetros analisados: a velocidade de subidas das bolhas, as frações de vazio e de líquido e o gradiente de pressão.

O terceiro capítulo é a fundamentação teórica, onde apresenta-se a base teórica para o entendimento da dissertação. A primeira parte deste capítulo define o escoamento bifásico, os padrões de escoamento e os métodos de análise. Em seguida, apresenta-se a teoria dos métodos numéricos utilizados como: método de Runge-Kutta de 4ª ordem e o

método da secante. Por fim, são definidas as variáveis cinemáticas do escoamento bifásico.

No quarto capítulo, apresenta-se os materiais e métodos utilizados. Este capítulo é dividido em duas partes principais: a primeira é sobre os procedimentos experimentais, comentando em detalhes a instalação experimental montada; a segunda é sobre os procedimentos numéricos, abordando o modelo numérico utilizado e o método de solução.

O quinto capítulo trata dos resultados e das discussões, onde apresenta-se a comparação dos resultados numéricos com os experimentais. Os resultados obtidos são dos padrões de escoamento, da fração de vazio e do gradiente de pressão.

O sexto capítulo apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 ESTADO DA ARTE

Os escoamentos bifásicos são encontrados em vários ramos da indústria. No projeto de equipamentos, onde ocorre simultaneamente escoamento de gás e de líquido, é determinante que se tenha o conhecimento mais preciso possível das características hidrodinâmicas mais importante como: o tipo de regime de escoamento, as transições entre regimes, as frações de vazio e de líquido e a diferença de pressão.

Os diversos parâmetros a ter em conta nos escoamentos bifásicos podem ser divididos em:

**Propriedades físicas dos fluidos:** estado físico, massas volúmicas, viscosidades, temperatura e tensões superficiais;

**Característica da tubagem:** diâmetro interno, comprimento, rugosidades/tipo de material e inclinação (vertical, horizontal ou inclinado);

**Característica do escoamento:** o escoamento pode ser dividido em relação ao sentido e direção. Os sentidos são co-corrente ascendente ou descendente, ou contra-corrente. E a direção é consequência da inclinação da tubagem. Deve-se também ter em consideração o modo como o gás é introduzido na tubagem, se o escoamento é em regime estacionário ou transiente e se há ou não transferência de massa e calor.

Há também ramos específicos em relação a área de estudo dos escoamentos bifásicos: velocidades de subidas das bolhas, frações de vazio de líquido, gradiente de pressão, mapas de padrões de escoamento, dispersão e transferência de massa e calor entre as fases.

Este trabalho restringe-se ao escoamento bifásico de ar-água numa tubagem vertical com diâmetro constante. Este escoamento será co-corrente ascendente, com a mistura ar-água introduzida na base da tubagem em regime permanente e sem transferência de massa e calor. Os parâmetros deste escoamento estudadas foram a fração de vazio e o

gradiente de pressão. Os resultados numéricos e experimentais destas grandezas também foram comparados entre si.

Uma síntese dos estudos pioneiros dos parâmetros estudados é apresentada nas secções seguintes. Estudos sobre a velocidade de subida das bolhas são apresentados na secção 2.1; sobre as frações de vazio e de líquido na secção 2.2 e sobre o gradiente de pressão na secção 2.3.

## 2.1 VELOCIDADE DE SUBIDA DAS BOLHAS

Os estudos pioneiros em relação aos escoamentos bifásicos foram sobre às velocidades de subida das bolhas em meio estagnado de líquido, por exemplo água.

A determinação da velocidade das bolhas reveste-se de grande importância, devido às implicações que tem no cálculo de variáveis do escoamento como as frações de vazio e de líquido, a diferença de pressão e as taxas de transferências de massa e calor. Os estudos pioneiros foram realizados em tubagens verticais por (Harmathy 1960, Nicklin 1962, White e Beardmore 1962, Zuber e Findlay 1965, Wallis 1969). De um modo geral, as velocidades das bolhas dependem de vários fatores: do seu diâmetro, diâmetro da tubagem, propriedades físicas do sistema gás-líquido, dos caudais das fases e da inclinação da tubagem.

## 2.2 FRAÇÕES DE VAZIO E DE LÍQUIDO

A fração de vazio ou retenção de gás é definida pela percentagem ocupada pelo gás numa determinada seção reta da coluna. A fração de vazio somada com a fração de líquido deve ser igual à uma unidade, ou seja, se o valor da fração de vazio é conhecido automaticamente também é conhecido a valor da fração de líquido. Os autores pioneiros foram Nicklin (1962), Ansari *et al.*, (1994) e Yamaguchi (1982) para o escoamento vertical ascendente de ar-água no regime *Bubble flow* (Bolhas). De acordo com Nicklin (1962), a fração de vazio é razão entre a velocidade superficial da fase gasosa e a velocidade das bolhas. A velocidade das bolhas está detalhada na seção 4.2.3. Ansari *et al.* (1994) apresentam para a fração de vazio uma relação analítica e implícita, considerando que as bolhas sobem mais concentradas no centro do que próximo das paredes do tubo tendo em conta o efeito da retenção na velocidade das bolhas. Yamaguchi e Yamazaki (1982) apresentaram uma correlação generalizada baseada na análise dimensional.

A medição experimental da fração de vazio pode realizar-se através de vários

métodos. De acordo com Wu *et al.* (2017), os métodos mais utilizados são:

1. Análise de imagens por tomografia de raio-X (Jones e Zuber 1975);
2. Radiografia utilizando neutrões (Mishima e Hibiki 1996);
3. Tomografia com impedância elétrica (Schlegel et al. 2009, Chalgeri e Jeong 2019);
4. Sensor de malha de arame duplo (Szalinski et al. 2010);
5. Câmara de alta velocidade (Chalgeri e Jeong 2019);
6. Análise volumétrica pelo método do fecho síncrono das válvulas (YAMAGUCHI e YAMAZAKI 1982, Xue et al. 2016).

### 2.3 GRADIENTE DE PRESSÃO

O gradiente de pressão é a variação da pressão por unidade de comprimento da tubagem. O cálculo da variação de pressão num escoamento bifásico geralmente é obtido pelas expressões desenvolvidas para escoamento monofásico, realizando as alterações necessárias ao nível das propriedades da mistura, das velocidades das fases e do cálculo do fator de atrito. Geralmente, o cálculo do gradiente de pressão para um escoamento gás-líquido é expresso como o somatório de três componentes: gravitacional (ou hidrostática), atrito (ou fricção) e aceleracional (Ansari et al. 1994). Dado que a velocidade das fases permanece aproximadamente constante, a componente aceleracional é desprezável, exceto quando há variação da área da secção transversal da tubagem.

Os modelos numéricos para a determinação do gradiente de pressão geralmente são restritos ao padrão de escoamento. Sendo assim, apresentam-se a seguir modelos para o padrão *Bubble flow* (Bolhas).

De acordo com Lima (2011), os primeiros modelos que forneceram melhorias nas relações cinemáticas para a representação das variáveis do escoamento foram Bankoff (1960) (Bankoff 1960), Griffith e Wallis (1961) e Zuber e Findlay (1965). A partir destas relações cinemáticas foi possível desenvolver modelos para prever numericamente o gradiente de pressão. Alguns modelos são: homogéneo, modelo separado ou modelo de dois fluidos, o *drift-flux model* que é um dos modelos de mistura. Dentre estes modelos, o utilizado será o modelo de mistura. O modelo mais conhecido é *drift-flux model* (Ishii 1975) que é umas das versões do modelo de mistura. Este modelo pode ser expresso em termos das velocidades de difusão das fases, ou seja, as velocidades das fases com

relação à velocidade do centro de massa da mistura, ou ainda, em termos das velocidades de deslizamento das fases, ou seja, as velocidades das fases com relação à velocidade do centro de volume da mistura.

Uma versão alternativa do modelo de mistura foi apresentada por Pauchon *et al.* (1994). Estes autores propõem que as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento da mistura sejam expressas em termos das variáveis primitivas do escoamento de cada fase, ao invés de utilizar as propriedades da mistura e a velocidade de difusão. Esta versão alternativa foi mostrada por Lima (2011) e também é seguida neste trabalho. Uma das vantagens deste modelo é uma formulação mais simples e com um menor número de equações, o modelo de mistura reduz o processamento computacional, principalmente em aplicações onde este processamento é um fator decisivo.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

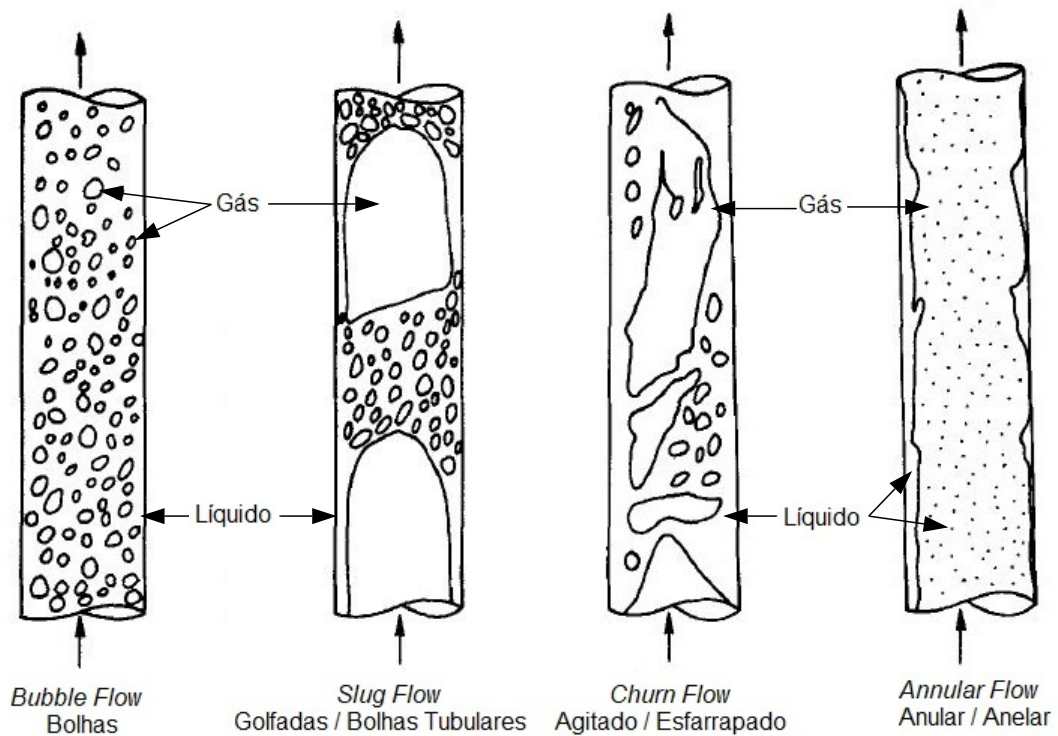
#### 3.1 ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Escoamentos multifásicos ocorrem quando duas ou mais fases escoam simultaneamente, sendo o escoamento bifásico o mais simples deste. O termo bifásico refere-se a duas fases da mesma substância química, por exemplo, vapor de água e água. Escoamento com substâncias químicas diferentes são chamados bi-componentes, por exemplo, ar e água ou líquido-líquido imiscíveis. Porém, o termo mais utilizado para descrever um escoamento simultâneo de duas fases ou componentes é o termo escoamento bifásico, (Wallis 1969).

#### 3.2 PADRÕES DE ESCOAMENTO

A principal diferença entre um escoamento monofásico e um escoamento bifásico gás-líquido é a existência de regimes ou padrões de escoamento. O termo padrão refere-se a configuração geométrica das fases gasosa e líquida na tubagem. Quando gás e líquido escoam simultaneamente na tubagem, as duas fases podem se distribuir em várias configurações de fluxo diferentes. Essas configurações de fluxo se diferem umas das outras na distribuição interfacial, resultante das características no fluxo como as velocidades e frações das fases. Os padrões de escoamento são dependentes das variáveis: caudais de líquido e gás; geometria da tubagem, diâmetro interno e inclinação; e as propriedades físicas das fases, densidades, viscosidades e tensão superficial (Shoham 2005).

A classificação do padrão de escoamento é usualmente visual podendo gerar confusão na determinação do padrão. Sendo assim, a classificação seguida neste trabalho é dada de acordo com (Taitel et al. 1980, Cheng e Lin 2001, Wu et al. 2017). Os quatro padrões principais para escoamento bifásico co-corrente ascendente são: Bolhas, Golfadas/Bolhas Tubulares, Agitado/Esfarrapado e Anular/Anelar, sendo usualmente designados, em inglês por: *Bubble flow*, *Slug flow*, *Churn flow* e *Annular flow*, ver Fig.(3.1).



**Figura 3.1:** Representação dos quatro principais padrões de escoamento gás-líquido vertical ascendente.

**Fonte:** Adaptado de Taitel *et al.* (1980)

O padrão de escoamento estudado será o *Bubble Flow* (Bolhas). Muitos autores como (Barnea et al. 1985, Barnea 1987), utilizam uma sub classificação do padrão bolhas em 2 sub-regimes: *Bubble* e *Dispersed bubble*. Segundo (Barnea et al. 1985) o termo *Bubble* aplica-se a caudais de líquido mais baixos e não aparece em todas as inclinações e em todos os diâmetros de tubo. O termo *Dispersed bubble* aparece sempre associado a caudais de líquido mais elevados, onde as pequenas bolhas dispersas no líquido são resultado da quebra das bolhas de grande volume devido à ação turbulenta associada a esses caudais elevados, podendo aparecer em todas as inclinações. Nesta sub-classificação, o padrão estudado é o *Bubble* (Bolhas), nesta definição a fase gasosa é dispersa em pequenas bolhas, movendo para cima em movimento zigzag, em uma fase contínua de líquido. Para um escoamento vertical, a distribuição das bolhas é aproximadamente homogênea na seção transversal da tubagem. O escoamento no padrão bolhas ocorre para baixas velocidades de líquido e de gás, com baixa turbulência, e é caracterizado pelo deslizamento entre as fases gás-líquido, resultando em altos valores de fração de líquido (Shoham 2005).

### 3.3 MÉTODOS DE ANÁLISE

Escoamentos bifásicos obedecem todas as leis da mecânica dos fluidos. As equações são moderadamente mais complicadas ou mais numerosas comparadas ao escoamento monofásico. As técnicas para a análise do escoamento unidimensional são divididas em níveis de complexidade e dependentes da quantidade de informações necessárias para descrever o escoamento (Wallis 1969).

O método mais simples de análise são as correlações. Os dados das correlações experimentais são escolhidos para obter equações com o mínimo de trabalho analítico. Desde que sejam aplicadas a situações similares àquelas que foram usadas para obter os dados originais, elas podem ser bastante satisfatórias, dentro de limites estatísticos que geralmente são conhecidos (Wallis 1969).

O método utilizado foi a análise diferencial, implementada no *software* MATLAB<sup>®</sup>. Na análise diferencial, o campo da velocidade é deduzido das equações diferenciais da conservação da massa e da quantidade de movimento. As vantagens deste método são a rapidez, a facilidade de realizar vários testes e uma satisfatória precisão em descrever o escoamento. Para solucionar estas equações diferenciais, são necessários métodos numéricos. Os métodos utilizados para resolver as equações diferenciais foram o método de Runge-Kutta de 4<sup>a</sup> ordem simultaneamente com o método da Secante.

### 3.4 MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE 4<sup>a</sup> ORDEM

Como descrito na seção 3.3, a solução do modelo para descrever o escoamento bifásico será através de equações diferenciais. As equações do modelo de mistura, seção 4.2.1, são equações diferenciais ordinárias homogêneas e implícitas. Estas equações são integradas numericamente através de métodos como o Runge-Kutta de 4<sup>a</sup> ordem (RK-4) e o da secante.

O método RK-4 permite uma maior precisão, mas envolve mais cálculos em cada interação. O método envolve uma média ponderada de valores  $y'(x, y)$  em diferentes pontos do intervalo  $x_n \leq x \leq x_{n+1}$  e pode ser escrito genericamente como (Chapra 2005):

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + k_4) \quad (3.1)$$

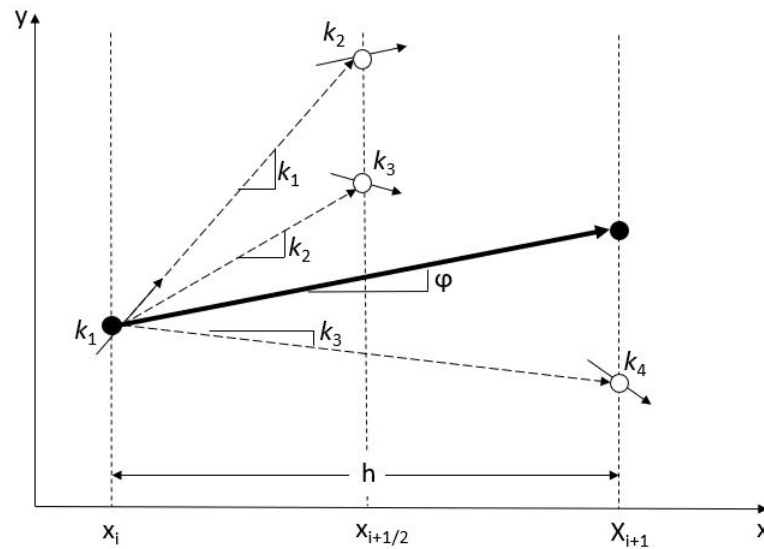
onde:

$$K_1 = f(x_k, y_k) \quad (3.2)$$

$$K_2 = f\left(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}K_1\right) \quad (3.3)$$

$$K_3 = f\left(x_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}K_2\right) \quad (3.4)$$

$$K_4 = f(x_k + h, y_k + hK_3) \quad (3.5)$$



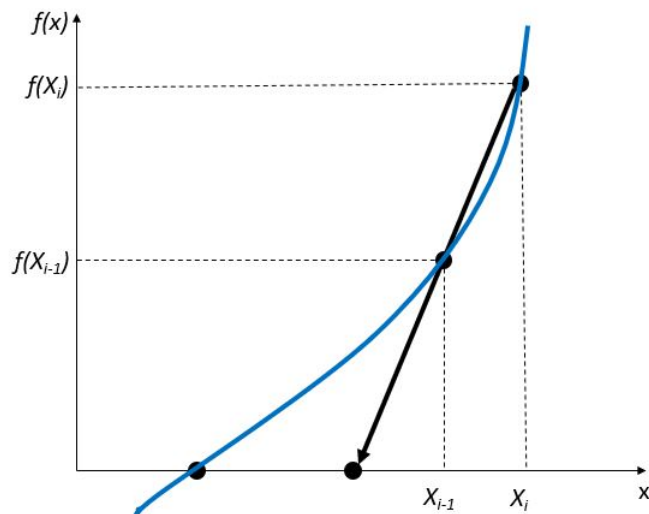
**Figura 3.2:** Representação gráfica das estimativas de inclinação do método RK de quarta ordem.

Observa-se na Fig.(3.2) as inclinações estimadas pelo método para cada passo. Ou seja, o método requer cálculo de valores  $y'(x, y)$  em três pontos distintos,  $K_1$  corresponde à derivada no primeiro ponto do intervalo  $[x, x + h]$ , que é usada para determinar um ponto no meio do intervalo  $(x + h/2)$  onde se avalia novamente o valor de  $y'$ , ou  $K_2$ . O valor de  $K_2$  é usado então para determinar um novo ponto a meio do intervalo, onde se calcula um outro valor possível para a derivada,  $K_3$ . Por fim,  $K_3$  permite determinar um quarto ponto em  $(x + h)$ , onde se avalia novamente o valor de  $y'$ .

Tem-se então 4 valores estimados para  $y'$  no intervalo  $[x, x + h]$  :  $K_1, K_2, K_3$  e  $K_4$ . O valor da derivada a usar para aproximar a função no ponto  $(x + h)$ , é uma média ponderada dos quatro valores encontrados, sendo que se atribui mais peso aos dois valores intermédios,  $K_2$  e  $K_3$  (Chapra 2005).

### 3.5 MÉTODO DA SECANTE

O método da secante é utilizado para encontrar a raiz (ou solução) de uma equação  $f(x) = 0$ . Esse método é semelhante ao método de Newton, mas substitui o cálculo das derivadas pelo cálculo de uma razão incremental (Ruggiero 1995). Geometricamente, corresponde a substituir o papel da tangente, no método de Newton, por uma secante, Fig.(3.3) (Chapra 2005). Ou seja, será necessário dois pontos iniciais para o método convergir para a raiz da equação.



**Figura 3.3:** Representação gráfica do método da secante.

A equação para cada iteração do método da secante é dada por:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)(x_{n-1} - x_n)}{f(x_{n-1}) - f(x_n)} \quad (3.6)$$

com valores de  $x_n$  e  $x_{n-1}$  conhecidos.

### 3.6 MÉTODO RK-4 IMPLÍCITO

O modelo de mistura utiliza equações diferenciais para descrever o movimento dos fluidos. Em um escoamento bifásico, muitas variáveis ficam dependentes de variáveis primitivas do escoamento, comportamento detalhado na seção 4.2.5. Portanto, é necessário resolver uma equação diferencial ordinária implícita. A solução desta equação utiliza os dois métodos, descritos respectivamente nas seções 3.4 e 3.5 em conjunto. Para cada passo interno do método RK-4, ou seja  $K_1, K_2, K_3$  e  $K_4$ , deve-se determinar implicitamente o valor da pressão da mistura ( $P$ ), utilizando o método da secante.

### 3.7 VARIÁVEIS RELACIONADAS AO ESCOAMENTO BIFÁSICO

Para um melhor entendimento do fenômeno do escoamento bifásico, são apresentadas as definições das variáveis utilizadas. Seja  $k$  uma fase, gás ( $G$ ) ou líquido ( $L$ ), as variáveis médias na seção transversal da tubagem, de diâmetro interno  $D$ , que representam propriedades das fases ou da mistura no escoamento gás-líquido, são definidas segundo Ishii (Ishii 1975) e Shoham (Shoham 2006):

**Fração de Líquido,  $R_s$ , e Fração de vazio/gás ou retenção de gás,  $\alpha$**  - são as frações de área ocupadas pelas fases líquida e gasosa, respectivamente. Para um escoamento bifásico,  $R_s + \alpha = 1$ . Para um escoamento monofásico,  $R_s = 1$  e  $\alpha = 0$  ou  $R_s = 0$  e  $\alpha = 1$  (Shoham 2005).

**Massa volúmica da mistura  $\rho_m$  [kg/m<sup>3</sup>]** - Sendo  $\rho_G$  e  $\rho_L$ , respectivamente, as massas volúmicas do gás e do líquido. Essas variáveis são consideradas constantes na seção transversal da tubagem, uma vez que o gradiente de pressão na transversal seja baixo (considerado nulo), isto ocorre quando a seção transversal da tubagem é constante. A massa volúmica da mistura é resultante do somatório das massas volúmicas de cada fase ponderadas pelas suas frações:

$$\rho_m = \alpha\rho_G + R_s\rho_L \quad (3.7)$$

Para o cálculo da massa volúmica do gás utiliza-se a lei de gás ideal para um escoamento isotérmico,  $\rho_G = P/(R_{esp}.T_0)$ . Sendo  $P = P_k$  a pressão da mistura,  $R_{esp}$ . a constante específica do gás ideal e  $T_0$  a temperatura do escoamento. Já a massa volúmica do líquido é constante por toda tubagem, uma vez que o líquido é incompressível.

**Velocidade real das fases  $U_L$  e  $U_G$  [m/s]** - Cada fase ocupa uma certa fração da seção transversal da tubagem. Logo, a velocidade real das fases líquido e gás são, respectivamente:

$$U_L = \frac{Q_L}{A_L} = \frac{Q_L}{A.R_s} \quad \text{e} \quad U_G = \frac{Q_G}{A_G} = \frac{Q_G}{A.\alpha} \quad (3.8)$$

onde  $Q_L$  e  $Q_G$  são respectivamente, os caudais volumétricos de líquido e gás e  $A$  é a área da seção transversal ( $A = \pi D^2/4$ ).

**Velocidade real da mistura  $U$  [m/s]** - é equivalente a velocidade do centro de massa da mistura e é determinada através da conservação de fluxo mássico da mistura, ou

seja, o fluxo mássico da mistura é igual ao somatório dos fluxos mássicos das fases:

$$U = \frac{\alpha\rho_G U_G + (1 - \alpha)\rho_L U_L}{\rho_m} \quad (3.9)$$

**Velocidade superficial das fases,  $J_L$  e  $J_G$  [m/s]** - A velocidade superficial de cada fase é o fluxo volumétrico de cada fase, ou seja, representa a taxa do fluxo volumétrico por unidade de área. Em outras palavras, a velocidade superficial de cada fase é a velocidade que cada fase teria escoando sozinha na tubagem. Então as velocidades superficiais de líquido e gás são, respectivamente:

$$J_L = \frac{Q_L}{A} \quad \text{e} \quad J_G = \frac{Q_G}{A} \quad (3.10)$$

**Velocidade superficial da mistura  $J$  [m/s]** - Corresponde a velocidade do centro de volume da mistura e é definida pelo somatório das velocidades superficiais das fases:

$$J = J_L + J_G = R_s U_L + \alpha U_G \quad (3.11)$$

**Velocidade das bolhas ascendente** - é definida pelo somatório da velocidade superficial da mistura, multiplicada por uma constante, e da velocidade de subida das bolhas em meio estagnado de líquido. (Nicklin 1962):

$$\frac{J_G}{\alpha} \equiv U_B = C_{0,B} J + (V_{\infty,B}) \quad (3.12)$$

$C_{0,B}$  é um parâmetro de distribuição da velocidade das bolhas na fase líquida e  $V_{\infty,B}$  é a velocidade de subida das bolhas em um meio estagnado de líquido, ou seja, expressa a magnitude do movimento relativo entre as fases. Essas variáveis dependem do padrão de escoamento, no caso bolhas.

**Fluxo Mássico da Fase  $G_k$  [kg/m<sup>2</sup> s]** - é definido pelo produto entre a velocidade real da fase e a sua massa específica, ponderada pelas suas respectivas frações, definida por:

$$G_L = (1 - \alpha)\rho_L U_L \quad \text{e} \quad G_G = \alpha\rho_G U_G \quad (3.13)$$

**Velocidade de deslizamento média  $V_{G,J}$  [m/s]** - é definida pela diferença entre a velocidade da fase (no caso gasosa) e a velocidade do centro de volume da mistura:

$$V_{G,J} = U_G - J \quad (3.14)$$

**Relações cinemáticas entre as velocidades** - a partir das definições das velocidades das Eq.(3.9),(3.11) e (3.14) é possível determinar as velocidades das fases  $U_G$  e  $U_L$

em função da velocidade da mistura  $U$  e a velocidade de deslizamento média  $V_{G,J}$ .

$$U_G = U + \left( \frac{\rho_L}{\rho} \right) V_{G,J} \quad (3.15)$$

$$U_L = U - \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \left( \frac{\rho_G}{\rho} \right) V_{G,J} \quad (3.16)$$

Com as Eqs.(3.15) e (3.16) pode-se determinar a velocidade superficial da mistura  $J$  em função da velocidade real da mistura  $U$  e a velocidade de deslizamento média,  $V_{G,J}$ :

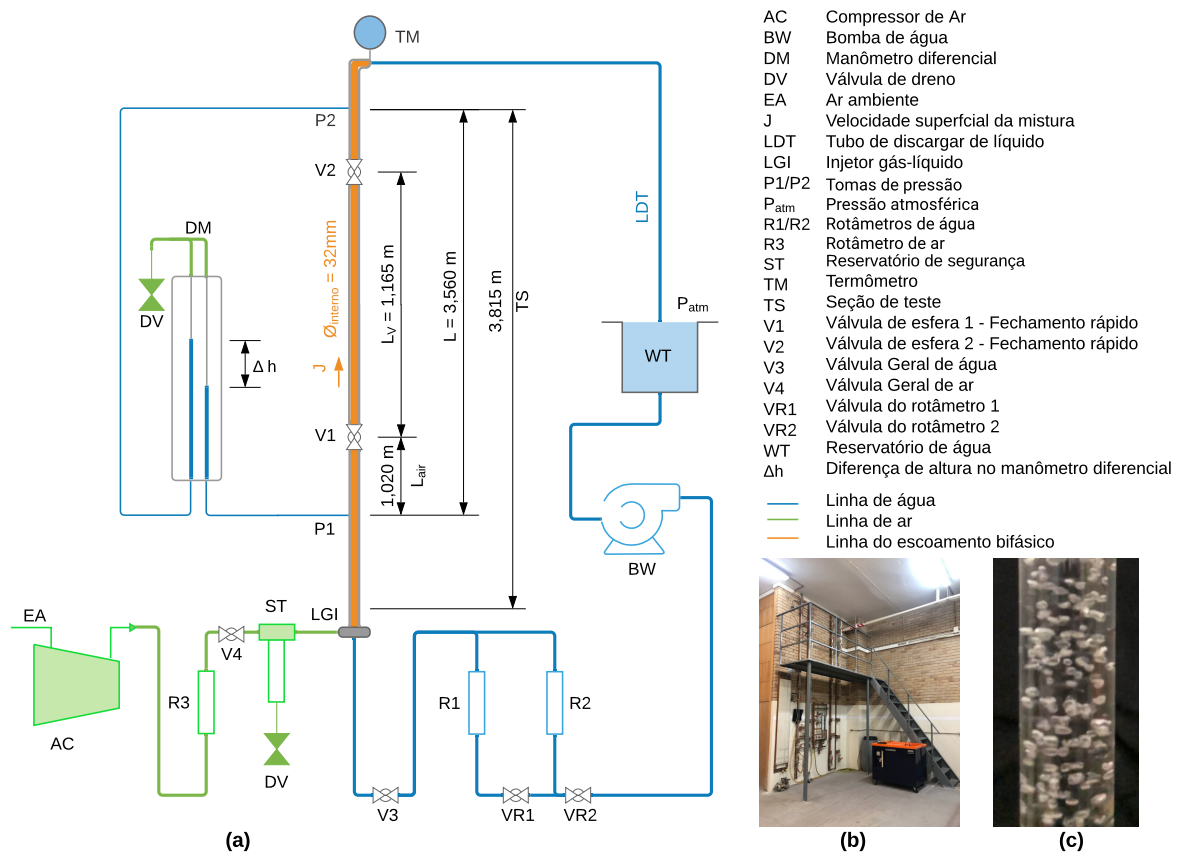
$$J = U + \alpha \left( \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) V_{G,J} \quad (3.17)$$

Estas relações entre as velocidades das fases serão utilizadas na seção (4.2.5), para demonstrar a dependência dessas variáveis com a pressão da mistura ( $P$ ).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAIS

As experiências foram realizadas num tubo vertical de acrílico com diâmetro interno constante de 0,032m e 3,815m de comprimento. A diferença de pressão,  $\Delta P$ , foi medida através de um manómetro diferencial, onde foram conectadas 2 tomas de pressão distanciadas 3,560 m: uma na base e a outra no topo da coluna. A representação esquemática da instalação experimental é mostrada na Fig.(4.1).



**Figura 4.1:** (a) Representação esquemática da instalação experimental, (b) Aparato experimental, (c) Escoamento experimental no regime Bolhas.

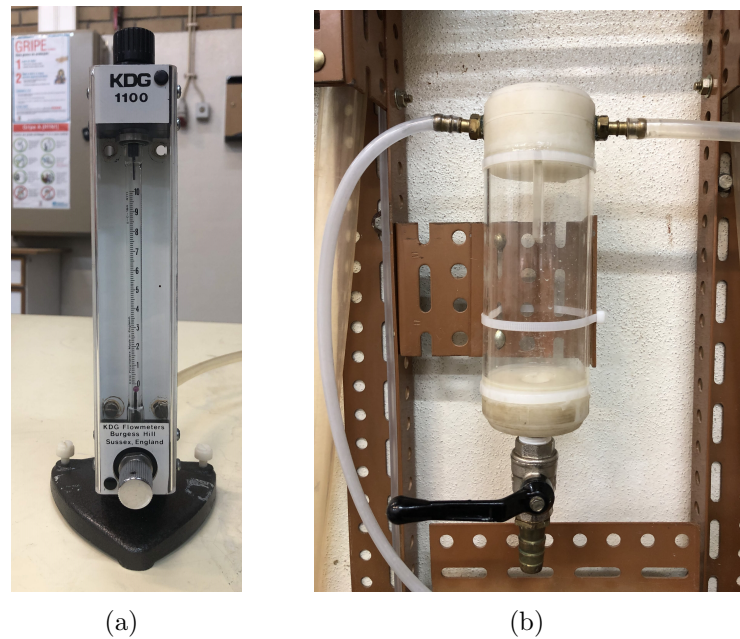
Na coluna também foram instaladas duas válvulas de esfera, V1 e V2, distanciadas 1,165 m para medição da fração de vazio média, ver Fig.(4.1). A linha azul na Fig.(4.1) representa o circuito de água. A água é introduzida na base da coluna através de uma bomba centrífuga, BW. O caudal de água é regulado por uma válvula de esfera VR1 ou VR2, e medida por um dos rotâmetros R1 (KDG - Houdec S7E-60) ou R2 (RDG - Houdec - S18xE500) dispostos em paralelo e funcionando isoladamente, com 3,00% de incerteza. O rotâmetro R1 controla um caudal de 6 l/h à 60 l/h e o rotâmetro R2 um caudal de 50 l/h à 500 l/h, Fig.(4.2).



**Figura 4.2:** Rotâmetro para medição do caudal de água, R1 da esquerda e R2 da direita.

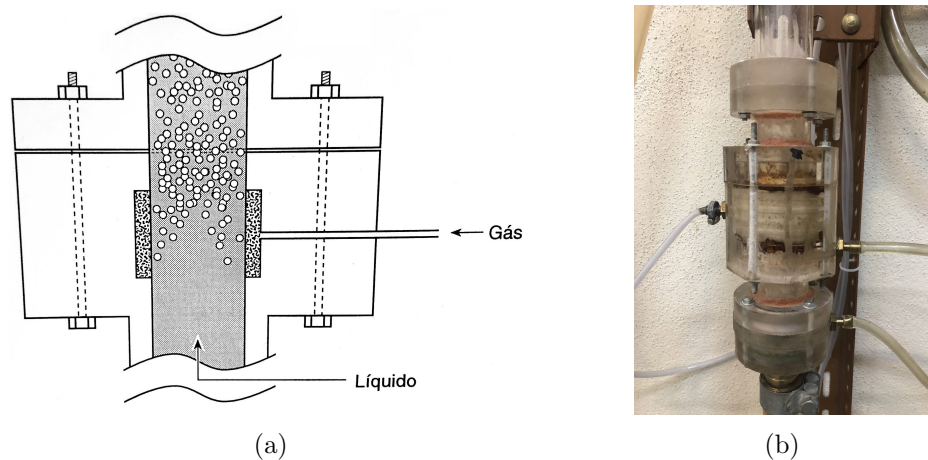
O circuito de ar é representado pelas linhas verdes da Fig.(4.1). Utilizou-se um compressor de ar, AC, com uma pressão máxima de  $6,00 \times 10^5$  Pa. O caudal é controlado por um rotâmetro R3 (KDG-1100 - 2C-150 - ruby ball), Fig.4.3(a), que permite um caudal mínimo e máximo de, respectivamente, 36 l/h e 60 l/h, com uma incerteza de 5,00%. A calibração do rotâmetro de ar foi realizada com vários caudais de água e posteriormente utilizada uma escala de conversão fornecida pelo fabricante. Afim de precaver que por acidente a água entrasse no circuito de ar e prejudicasse a medição do caudal de ar, construiu-se um reservatório de segurança, Fig.4.3(b).

O ar foi introduzido na base da coluna por um injetor de difusão, LGI, de material poroso feito em *nylon*, Fig.(4.4). Esse injetor de difusão permite a formação de bolhas de



**Figura 4.3:** (a) Rotâmetro de ar (R3), (b) Reservatório de segurança.

diâmetro reduzido ( $\sim 0,003m$ ) e uma mistura apropriada com água.



**Figura 4.4:** Injetor de difusão LGI. (a) Desenho esquemático, (b) Injetor de difusão.

Foram testados seis velocidades superficiais de líquido,  $J_L$ , entre  $1,727 \times 10^{-2}$  m/s e  $10,360 \times 10^{-2}$  m/s com cinco velocidades superficiais de gás,  $J_G$ , entre  $1,243 \times 10^{-2}$  m/s e  $2,072 \times 10^{-2}$  m/s. Para cada par de velocidades superficiais, o gradiente de pressão,  $\Delta P/L$ , e a fração de vazio,  $\alpha$ , foram medidos. Realizaram-se as experiências à temperatura ambiente variando entre  $17,5^\circ\text{C}$  e  $18,5^\circ\text{C}$ , medidas na secção final de teste, TS, por um termómetro, TM.

Montou-se uma lista de procedimentos, tendo como referência a Fig.4.1(a), para evitar erros e sistematizar o processo de medição. Primeiramente, obtiveram-se as medidas

experimentais do gradiente de pressão através de um manómetro diferencial e posteriormente as frações de vazio por dois métodos: *fecho síncrono das válvulas e relação de Zuber/Nicklin*. O procedimento é descrito a seguir:

1. Verificar se as válvulas estão abertas: V1, V2, V3;
2. Fechar a válvula V4, para evitar a entrada de água na linha de gás;
3. Ligar a bomba de água com seu caudal máximo para retirar todo o ar do circuito;
4. Regular o caudal de água pretendido com um dos rotâmetros R1 ou R2, aguardar o sistema estabilizar;
5. Aferir o manómetro diferencial retirando a água do seu interior e abrir a válvula de purga de ar, DV;
6. Retirar/Purgar o ar das mangueiras das tomas de pressão que são conectadas ao manómetro diferencial, garantindo que fiquem sempre apenas com água;
7. Verificar os níveis de altura de água no manómetro diferencial, apenas com água, afim de garantir a estabilidade do sistema, que se considera atingida quando a diferença de altura,  $\Delta h$ , permanece aproximadamente constante (admitindo-se um valor inferior a 0,002 m);
8. Introduzir o gás, abrindo a válvula V4, com baixos caudais ( $\sim 24$  l/h) e pressões ( $\sim 1$  bar), afim de evitar qualquer entrada de gás nas mangueiras de toma de pressão;
9. Regular o caudal de gás pretendido utilizando o rotâmetro R3;
10. Esperar que o sistema atinja o estado estacionário ( $\sim 2$  min), que se considera alcançado quando o desnível do manómetro  $\Delta h$  permanece constante, e posteriormente calcular o gradiente de pressão pela Eq.(4.1);
11. Posicionar (as duas pessoas) para o fecho (quase) síncrono das duas válvulas V1 e V2. A seguir fechar a válvula geral de água e ar, respectivamente, V3 e V4, desligar o compressor de ar, AC, em seguida desligar a bomba de água, BW. Tomar nota da altura medida ( $L_{gas}$ ) a partir da base da válvula V2 até à interface entre os dois fluidos, para calcular da fração de vazio, Eq.(4.2);
12. Abrir as válvulas de fecho rápido V1 e V2 permitindo que a coluna continue cheia de água, agora como meio líquido estagnado;

13. Medir a velocidade de deslizamento das bolhas,  $V_{\infty,B}$ , no meio de líquido estagnado, entre dois pontos da coluna distanciados 1,020 m,  $L_{V_{\infty,B}}$ . Ligar o compressor de ar e abrir em seguida a válvula V4, ajustar o caudal de ar pelo rotâmetro R3. Posteriormente, fechar a válvula V4 e desligar o compressor de ar AC, aguardar que a base da nuvem de bolhas passe pelo primeiro ponto e medir o tempo de subida com um cronómetro até atingir o segundo ponto.

#### 4.1.1 GRADIENTE DE PRESSÃO EXPERIMENTAL

A determinação do gradiente de pressão foi feita por intermédio do manómetro diferencial, Fig.(4.5). Se não havia circulação de fluidos e com a coluna cheia de líquido, a diferença de altura  $\Delta h$  era nula. Quando havia circulação de líquido, a diferença de altura  $\Delta h$  aumentava, aumentando ainda mais quando havia circulação simultânea de gás e líquido, devido ao aumento da fricção.

Com o sistema em funcionamento, e com os valores pretendidos das velocidades superficiais de gás,  $J_G$ , e de líquido,  $J_L$ , registrava-se o valor do desnível  $\Delta h = h_2 - h_1$  o qual permitia calcular a diferença de pressão entre a base e o topo da coluna, respectivamente,  $P_1$  e  $P_2$ , para o comprimento  $L$ , Fig.(4.5).

A diferença de pressão,  $\Delta P$ , ou o gradiente de pressão,  $\Delta P/L$ , são calculadas a partir da hidrostática, Eq.(4.1).

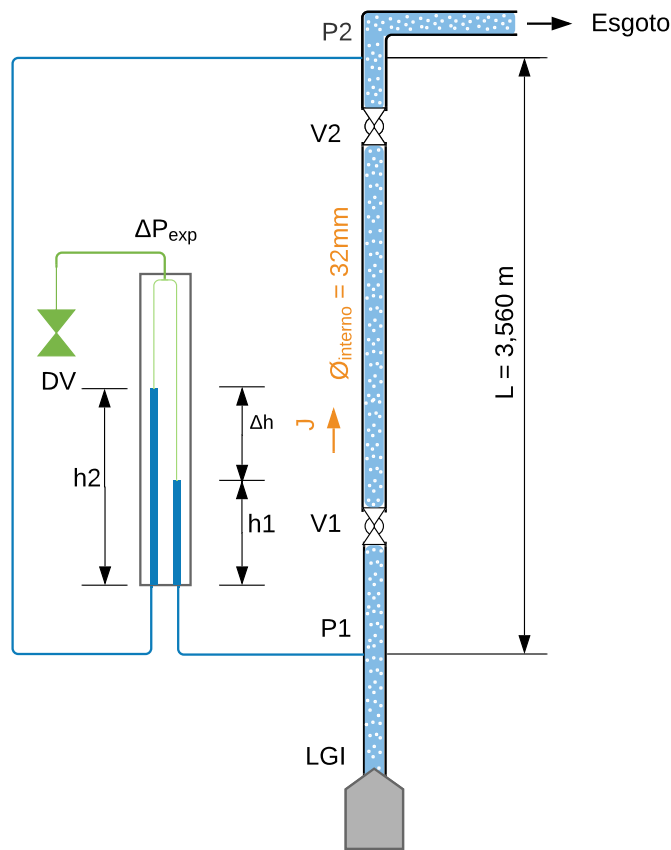
$$\frac{P_1 - P_2}{L} = \frac{\Delta P}{L} = \rho_L g - \frac{\rho_L g \Delta h}{L} \quad (4.1)$$

onde  $L$  é a distância entre as duas tomas de pressão na coluna,  $\rho_L$  é a massa volúmica do líquido e  $g$  é a aceleração da gravidade.

#### 4.1.2 FRAÇÃO DE VAZIO EXPERIMENTAL

A fração de vazio ou retenção de gás foi obtida através de dois métodos: o primeiro através do fecho rápido e síncrono das duas válvulas,  $V_1$  e  $V_2$ ; o segundo utilizando a relação de Zuber/Nicklin (Zuber e Findlay 1965, Nicklin 1962), recorrendo à velocidade de subida das bolhas em meio estagnado.

O primeiro método é simples e funcional (Wu et al. 2017), as válvulas de esfera foram utilizadas para interromper completamente o escoamento bifásico. Um vez que as duas válvulas são simultaneamente fechadas, é possível medir a altura de gás ( $L_{gas}$ ),



**Figura 4.5:** Representação esquemática do manômetro diferencial - princípio de funcionamento.

e então calcular a fração de vazio que é a razão entre a altura de gás e a altura total, distancia entre válvulas,  $L_V$ , Eq.(4.2).

$$\alpha_{exp} = \frac{L_{gas}}{L_V} \quad (4.2)$$

Este método foi denominado *fecho síncrono das válvulas*.

O segundo método utilizou a relação de Zuber (Zuber e Findlay 1965), complementado por Nicklin (Nicklin 1962), Eq.(4.3). Este método foi denominado *relação de Zuber/Nicklin*, e é obtido através do rearranjo da lei cinemática de deslizamento:

$$\alpha_{exp} = \frac{J_G}{J + V_{\infty,B}} \quad (4.3)$$

onde  $V_{\infty,B}$  é a velocidade de subida em um meio estagnado, experimentalmente medido a partir do comprimento  $L_{V_{\infty,B}}$ , mostrado na Fig.4.1(a), e com auxílio de um cronómetro e  $J = J_G + J_L$  é a velocidade superficial da mistura.

### 4.1.3 ANÁLISE DE INCERTEZA

Realizou-se a análise de incertezas das medições  $h_1$  e  $h_2$  para o cálculo da diferença de pressão experimental. A análise de incerteza é o procedimento usado para quantificar a validade dos dados e sua exatidão.

Existem duas classificações dos erros: erro fixo e erro aleatório. O erro fixo (sistemático) é o responsável por repetidas medições erradas da mesma quantidade em cada tentativa. Este erro pode ser eliminado pela calibração ou correção adequada do equipamento. O erro aleatório é diferente em cada leitura, e portanto, não pode ser eliminado. O objetivo da análise de incerteza é estimar o erro aleatório provável nos resultados experimentais (Fox R. W. e Prichard P 2010).

O objetivo da análise é estimar a incerteza das medições experimentais e de resultados calculados devido aos erros aleatórios. Esta análise pode ser dividida em três etapas: (1) estimar o intervalo de incerteza para cada quantidade medida; (2) declarar o limite de confiança em cada medição; (3) analisar a propagação de incerteza nos resultados a partir dos dados experimentais.

Na etapa 1, deve-se estimar o intervalo da incerteza de medição. Uma estimativa razoável da incerteza de medição decorrente do erro aleatório numa experiência de uma só amostra é geralmente a metade da menor divisão da escala do instrumento, no caso o manómetro diferencial. Na etapa 2, deve-se adotar o limite de confiança de cada medição. O intervalo de incerteza de uma medição deve ser enunciado em probabilidades específicas, ou seja, um medida realizada entre 20 medições deve estar dentro deste limite. Esta probabilidade de cerca de 20 para 1 corresponde a mais ou menos  $2\sigma$ , onde  $\sigma$  é o desvio padrão. Na etapa 3, é o calculo da propagação de incerteza.

A Eq.(4.4) é uma função onde as variáveis com suas respectivas incertezas são somadas, de acordo com (Holman 2010). A incerteza da medida final é dada por:

$$w_R = \left\{ \Sigma \left[ \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2 w_{x_i}^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (4.4)$$

onde  $w_R$  é a incerteza da medida R,  $x_i$  são as variáveis de que R depende e  $w_{x_i}$  é a incerteza que cada medição de  $x_i$ .

## 4.2 PROCEDIMENTO NUMÉRICO

### 4.2.1 MODELO DE MISTURA

O modelo de mistura é a aplicação do conceito de uma mistura para o escoamento bifásico, ou seja os componentes da mistura são tratados como um único fluido com características de viscosidades e massas volúmicas específicas. Este modelo é baseado na simplificação do modelo de dois fluidos, ou seja o número de equações de transporte para descrever o escoamento é reduzido (Lima 2011). Há duas variáveis para serem determinadas no modelo de mistura: a fração de vazio e a tensão de corte da mistura. Sendo assim, é necessário introduzir modelos ou equações para a determinação destas variáveis de fecho do modelo de mistura, as quais dependem do padrão de escoamento. Neste trabalho, o padrão de escoamento estudado foi bolhas ou *bubble flow*.

Uma forma alternativa do modelo de mistura, introduzida por Pauchon *et al.* (1994), propõe as equações de conservação da massa e quantidade de movimento para cada fase da mistura em termos das variáveis primitivas do problema, ao invés de utilizar as propriedades da mistura e a velocidade de difusão (Pauchon et al. 1994). Este modo alternativo foi desenvolvido para estudo em regime estacionário e transiente. Neste modelo, é necessário o conhecimento da relação do deslizamento entre as fases da mistura para o fecho do sistema de equações.

As principais equações do modelo de mistura são baseadas na modificação do modelo *drift flux*. As equações de conservação de massa para as fases gasosa e líquida são definidas, respectivamente, pelas Eqs.(4.5) e (4.6):

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_G \alpha_G] + \frac{\partial}{\partial z}[\rho_G \alpha_G U_G] = \Gamma, \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[\rho_L R_S] + \frac{\partial}{\partial z}[\rho_L R_S U_L] = -\Gamma, \quad (4.6)$$

onde  $U_G = J_G/\alpha_G$  e  $U_L = J_L/R_S$  são as velocidades das fases de gás e líquido ponderadas pelas frações volumétricas de cada fase, sendo  $\alpha$  a fração de vazio e  $R_S$  a fração de líquido. A variável  $\Gamma$  é o termo condicional de transferência de massa interfacial.

A equação da conservação do movimento do modelo de mistura, Eq.(4.7), é definida por (Pauchon et al. 1994):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}[\rho_G \alpha_G U_G + \rho_L R_S U_L] + \frac{\partial}{\partial z}[C_{V,G} \rho_G \alpha_G (U_G)^2 + C_{V,L} \rho_L R_S (U_L)^2] \\ & = -\frac{\partial}{\partial z}P - \frac{f}{2D}[\rho_G \alpha_G + \rho_L R_S]J^2 - [\rho_G \alpha_G + \rho_L R_S]g.\sin(\theta) \end{aligned} \quad (4.7)$$

onde  $C_{V,G}$  e  $C_{V,L}$  são os coeficientes de covariância, respectivamente, das velocidades das fases de gás e de líquido,  $\rho_G$  é a massa volúmica do gás,  $f$  é o fator de atrito,  $D$  é o diâmetro interno da coluna,  $P$  é a pressão da mistura,  $\theta$  é a inclinação da coluna ( $90^\circ$ ) e  $z$  é a coordenada axial ao longo da coluna, que varia de 0 até  $L$ . Para escoamentos turbulentos os perfis de velocidade e concentração são aproximadamente planos, tal que o coeficiente de covariância da velocidade das fases é aproximadamente igual à unidade,  $C_{V,k} \cong 1$ . Sendo assim, este coeficiente é omitido das equações de conservação de quantidade de movimento e nas equações dos modelos que se seguem (Lima 2011).

Considerando as condições de contorno, a equação da conservação da massa das fases gás e líquido, em regime permanente e na ausência de transferência de massa,  $\Gamma = 0$ , são reduzidas para:

$$\frac{d}{dz}[\rho_G \alpha_G U_G] = 0 \quad \therefore \quad \rho_G \alpha_G U_G = G_G = cte. \quad (4.8)$$

$$\frac{d}{dz}[\rho_L R_S U_L] = 0 \quad \therefore \quad \rho_L R_S U_L = G_L = cte. \quad (4.9)$$

com o fluxo mássico  $G_G$  e  $G_L$  de cada fase permanecendo constante ao longo da coluna.

A Eq.(4.7), conservação do momento da mistura, para estado estacionário e com  $\sin(90^\circ) = 1$  fica:

$$\frac{d}{dz} \left[ \sum_{k=G,L} C_{V,k} \rho_k \alpha_k (U_k)^2 \right] = -\frac{d}{dz} P - \frac{f}{2D} [\rho_G \alpha_G + \rho_L R_S] J^2 - [\rho_G \alpha_G + \rho_L R_S] g \quad (4.10)$$

Rearranjando os termos da Eq.(4.10) obtém-se:

$$\frac{d}{dz} \left[ P + \sum_{k=G,L} C_{V,k} \rho_k \alpha_k (U_k)^2 \right] = -\frac{f}{2D} [\rho_G \alpha_G + \rho_L R_S] J^2 - [\rho_G \alpha_G + \rho_L R_S] g \quad (4.11)$$

A Eq.(4.11) pode simplificar-se se forem usadas as velocidades das fases,  $U_G$  e  $U_L$ , com  $\alpha_G + R_S = 1$  e a Eq.(3.7), obtendo-se:

$$\frac{d}{dz} [P + \alpha \rho_G (U_G)^2 + (1 - \alpha) \rho_L (U_L)^2] = -\tau_{W,S} - \rho_m g \quad (4.12)$$

onde  $\tau_{W,S}$  é a força de atrito na parede por unidade de volume da mistura. Na Eq.(4.12) observa-se que na formulação do modelo de mistura, existem 3 variáveis para serem determinadas:  $P$ ,  $\alpha$  e  $\tau_{W,S}$ . Estas variáveis dependem do padrão de escoamento, no caso deste trabalho, Bolhas.

#### 4.2.2 MAPA DOS PADRÕES DE ESCOAMENTO

A determinação do padrão de escoamento é influenciada pelas condições de escoamento das fases, suas propriedades físicas e características da tubagem. Conhecendo-se estas variáveis é possível classificar os padrões de escoamento vertical ascendente, estudado neste trabalho, de acordo com (Taitel et al. 1980, Cheng e Lin 2001, Wu et al. 2017), em *Bubble Flow* (Bolhas), *Slug Flow* (Golfadas/Bolhas tubulares), *Churn Flow* (Agitado/Esfarrapado) e *Annular Flow* (Anular/Anelar). Optou-se em tratar a nomenclatura dos padrões de escoamento em inglês.

O algoritmo desenvolvido é capaz de classificar o padrão de escoamento de acordo com as velocidades das fases de entrada na tubagem. A partir das equações apresentadas por (Taitel et al. 1980) é possível desenvolver um mapa para os padrões de escoamento. De acordo com (Wu et al. 2017), a equação de transição mais precisa de *Bubble flow* para *Slug flow* é a equação apresentada por Taitel *et al.* (1980), Eq.(4.13). Já para as transições de *Dispersed Bubble flow* para *Bubble flow* e de *Slug flow* para *Churn flow* as equações mais confiáveis são de acordo com Barnea (1987), e para a transição de *Churn flow* para *Annular flow* é a equação de Mishima e Ishii (1984). As equações de transição apresentadas a seguir, utilizadas neste trabalho, são as propostas por Taitel *et al.* (1980). A Fig.(4.6) mostra um mapa de regime de escoamento dos mesmo autores.

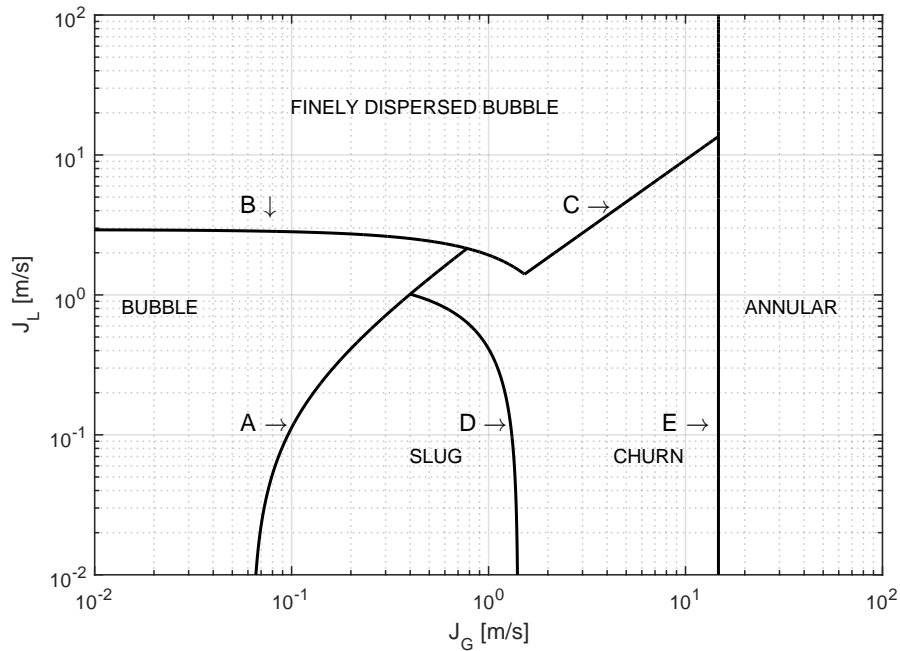
A Eq.(4.13) descreve a curva (A), da Fig.(4.6), de transição entre os padrões de escoamento *Bubble flow* para *Slug flow*.

$$J_L = 3J_G - 1.15 \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G)\sigma}{\rho_L^2} \right] \quad (4.13)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\rho_L$  é a massa volúmica do líquido,  $\rho_G$  é a massa volúmica do gás,  $\sigma$  é a tensão superficial gás-líquido. A Eq.(4.14) define uma relação entre as velocidades superficiais  $J_L$  e  $J_G$ , na qual o regime *Slug flow* não pode existir, representada pela curva (B), da Fig.(4.6). O limite máximo do domínio da curva (B), deve ocorrer quando a fração de vazio atingir um valor  $\alpha = 0,52$ , e começa a curva (C), da Fig.(4.6), descrita pela Eq.(4.15)

$$J_L = 4 \left\{ \frac{D^{0.429}(\sigma/\rho_L)^{0.089}}{\left(\frac{\mu_L}{\rho_L}\right)^{0.072}} \left[ \frac{g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right]^{0.446} \right\} - J_G \quad (4.14)$$

$$\frac{J_G}{J_G + J_L} = 0.52 \quad (4.15)$$



**Figura 4.6:** Mapa dos padrões de escoamento ar-água ascendente vertical para uma tubagem de 50mm de diâmetro.

**Fonte:** Adaptado de Taitel *et al.* (1980).

A transição entre os escoamento *Slug flow* e *Churn flow* é limitado pela curva (D), da Fig.(4.6), descrita pela Eq.(4.16), onde  $L_E$  é o comprimento da tubagem.

$$\frac{L_E}{D} = 40.6 \left( \frac{J_G + J_L}{\sqrt{gD}} + 0.22 \right) \quad (4.16)$$

A transição de *Churn flow* para *Annular flow* delimitada pela curva (E), da Fig.(4.6), representa a velocidade máxima que o escoamento do gás atinge, descrita pela Eq.(4.17).

$$J_G = \frac{3.1[\sigma g(\rho_L - \rho_G)]^{1/4}}{\rho_g^{1/2}} \quad (4.17)$$

Com este conjunto de equações e com dados de velocidades superficiais, massas volúmicas, viscosidades, tensão superficial entre as fases, diâmetro, comprimento e rugosidade do tubo e sua inclinação, pode-se desenvolver um algoritmo capaz de prever o padrão de escoamento.

### 4.2.3 FRAÇÃO DE VAZIO

A fração de vazio de acordo com o padrão de escoamento, no caso bolhas, foi determinado a partir do balanço volumétrico, em função da velocidade superficial de gás e da velocidade das bolhas dispersas. Este modelo de fração de vazio,  $\alpha$ , é obtido a partir da lei cinemática de deslizamento proposta por (Nicklin 1962, Zuber e Findlay 1965), Eq.(4.18):

$$\alpha = J_G/U_B \quad (4.18)$$

onde  $U_B$  é a velocidade das bolhas. De acordo com o proposto de Nicklin (1962), na qual assume que as bolhas se deslocam com a velocidade da mistura  $J$ , acrescida da velocidade de deslizamento local  $V_{\infty,B}$ , que é na prática a velocidade de subida da nuvem de bolhas em líquido estagnado.

$$U_B = C_{0,B}J + V_{\infty,B} \quad (4.19)$$

onde  $V_{\infty,B} = C_{\infty,B}(\Delta\rho Dg/\rho_L)^{1/2}$ . Outras fórmulas foram propostas para o cálculo de  $V_{\infty,B}$  (Zuber e Findlay 1965, Mishima e Hibiki 1996, Shen e Finch 1996), sendo que vários autores referem que se pode utilizar o valor de referência  $V_{\infty,B} = 0,20m/s$  sem que resulte em um erro apreciável no cálculo da velocidade das bolhas e outros parâmetros (Whalley 1987, Teixeira 1998).

Para bolhas dispersas, o parâmetro de distribuição  $C_{0,B}$  e a velocidade de deslizamento local adimensional  $C_{\infty,B}$  são definidos de acordo com a Eq.(4.20) e Eq.(4.21) respectivamente. Considerando o regime de bolhas dispersas, que resultam de efeitos de tensão superficial, viscosidade, inércia e impulsão (Ishii 1975).

$$C_{0,B} = 1.0 + 0.2 \left( 1 - \sqrt{\frac{\rho_G}{\rho_L}} \right) \quad (4.20)$$

$$C_{\infty,B} = \sqrt{2}(R_S)^n Eo^{-1/4} \quad (4.21)$$

onde  $n = 0$  para o regime de bolhas agitado e  $n = 7/4$  para o regime de bolhas distorcidas e considerando a condição de saturação  $R_S = 1 - \alpha$ . A variável  $Eo$  é o número de Eötvös definido por  $Eo = \Delta\rho D^2g/\sigma$ , com  $\Delta\rho = \rho_L - \rho_G$ .

Sendo assim, a Eq.(4.18) pode ser escrita em função da fração volumétrica de líquido:

$$f(R_S) = 1.0 - R_S - \frac{J_G}{(C_{0,B}J + V_{\infty,B})} = 0 \quad (4.22)$$

onde  $f(R_S)$  é uma função implícita de  $R_S$ , uma vez que  $V_{\infty,B}$  é dependente de  $C_{\infty,B}$ , mas  $C_{\infty,B}$  é dependente de  $R_S$  como mostrado na Eq.(4.21).

Portanto, a Eq.(4.22) é resolvida iterativamente utilizando um método de solução de equações não lineares como o método da secante, a cada passo de integração  $\Delta z$  do modelo de mistura, de modo a determinar  $R_S$  e as demais variáveis relacionadas.

#### 4.2.4 MODELO DE FORÇA DE ATRITO

O modelo homogêneo foi utilizado para estimar o valor de  $\tau_{W,S}$ , desde que o padrão de escoamento seja limitado ao padrão bolhas, pois neste modelo a mistura é considerada homogênea, aplicando a definição de viscosidade da mistura e os fatores de atrito monofásicos.

A força de atrito na parede por unidade de volume,  $\tau_{W,S}$ , pode definir-se pelo produto entre a tensão de corte da mistura,  $\tau_W$ , pela razão entre o perímetro  $S$  e a área da seção transversal da tubagem  $A$ .

$$\tau_{W,S} = \frac{\tau_W S}{A} = \frac{2C_f \rho_m J^2}{D} \quad (4.23)$$

onde  $C_f$  é o fator de atrito da mistura, dado pela fórmula empírica de Haaland (1983), Eq.(4.24), em função do número de Reynolds da mistura,  $Re_m$ , definido pela Eq.(4.25). Note-se que o fator de atrito da Eq.(4.23) se relaciona com o fator de atrito  $f$  da Eq.(4.7) por:  $f = 4C_f$ . Estas duas variáveis são dependentes da mistura: a massa volúmica  $\rho_m$  e a viscosidade  $\mu_m$  da mistura são, respectivamente, definidas pelas Eqs.(4.26) e (4.27) de acordo com (Dukler et al. 1964).

$$C_f = \left\{ -3.6 \log \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3.7D} \right)^{1,11} + \frac{6.9}{Re_m} \right] \right\}^{-2} \quad (4.24)$$

onde  $\varepsilon$  é a rugosidade absoluta do material da tubagem.

$$Re_m = \frac{\rho_m J D}{\mu_m} \quad (4.25)$$

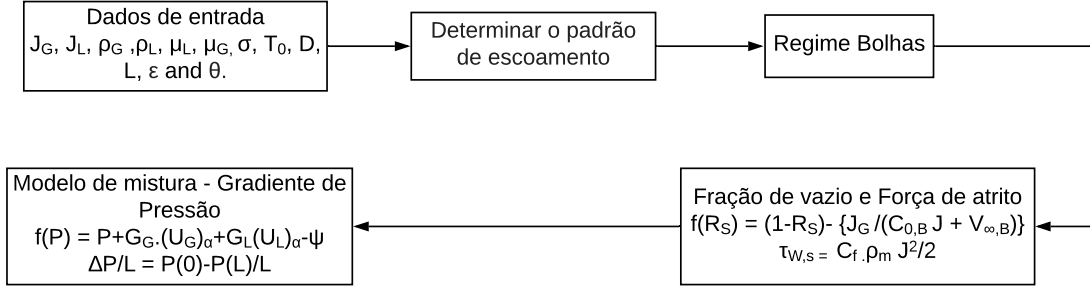
$$\rho_m = \alpha \rho_G + (1 - \alpha) \rho_L \quad (4.26)$$

$$\mu_m = \alpha \mu_G + (1 - \alpha) \mu_L \quad (4.27)$$

#### 4.2.5 SOLUÇÃO DO MODELO DE MISTURA

A solução do modelo de mistura implementada neste trabalho tem por referência principal o trabalho de Lima (2011) e é mostrada na Fig.(4.7). Os dados de entrada são definidos no início do modelo, com as propriedades dos fluidos e com as condições

geométricas da coluna ou tubagem. O padrão de escoamento é então determinado. Se o padrão de escoamento for bolhas, então a fração de vazio e a força de atrito são calculados de acordo com as Eqs.(4.22) e (4.23). Outros padrões de escoamento além de bolhas, não serão descritos neste trabalho. O último passo é o cálculo iterativo do gradiente de pressão Eq.(4.32), que será comentado a seguir.



**Figura 4.7:** Fluxograma da solução do modelo de mistura.

Solucionando a Eq.(4.10) o modelo de mistura é automaticamente resolvido. Contudo, a Eq.(4.10) foi reduzida para uma equação diferencial ordinária não homogênea:

$$\frac{d}{dz}[\Psi(z)] = -\tau_{W,S}(z) - \rho(z) \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (4.28)$$

onde  $\Psi(z) = P(z) + G_G U_G(z) + G_L U_L(z)$  é uma função implícita de  $P(z)$ . As variáveis da Eq.(4.28) também são dependentes de  $P(z)$  como mostrado nas Eqs.(4.31), (4.29) e (4.30):

$$U_G(z) = J_G(L)[P(L)/P(z)]/\alpha(z) \quad (4.29)$$

$$U_L(z) = J_L/[1 - \alpha(z)] \quad (4.30)$$

$$\rho_m(z) = \alpha(z)\rho_G(L)[P(z)/P(L)] + \rho_L[1 - \alpha(z)] \quad (4.31)$$

onde  $L$  é o ponto de medição da segunda toma de pressão dos fluidos na coluna, onde as variáveis são conhecidas. Estas equações são deduzidas das (3.15), (3.16) e Eq.(3.11) onde a variável  $\rho_m$  é dependente da variável  $\rho_G$  que depende da pressão  $P$  da mistura. Por isso, a solução da Eq.(4.28) está condicionada pela solução das equações que definem  $\alpha(z)$  e  $\tau_{W,S}(z)$  que também são dependentes de  $P(z)$ .

A Eq.(4.28) é numericamente integrada usando uma rotina Runge-Kutta de quarta ordem, programada em MATLAB<sup>®</sup>. O passo de integração  $\Delta z$  utilizado foi de  $D/4$ , onde mostrou-se suficiente para a solução do modelo. A variável  $P(z)$  é determinada através de uma solução iterativa de uma função implícita  $f(P)$ , definida por:

$$f(P) = P + G_G U_G + G_L U_L - \Psi = 0 \quad (4.32)$$

A solução da Eq.(4.32) pode ser obtida através do método da secante, a cada passo de integração  $\Delta z$ .

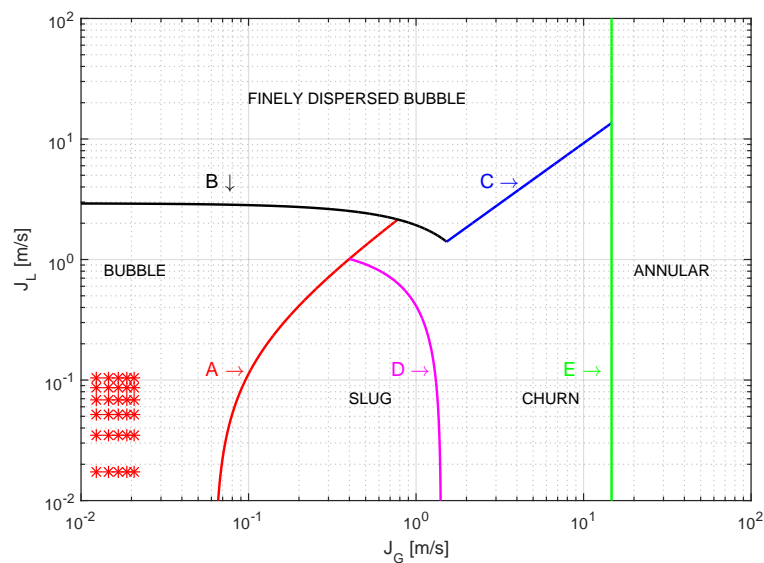
As condições de contorno para a solução das equações são: as velocidades superficiais das fases  $J_L$ ,  $J_G$  e a pressão da mistura  $P$ . Também é necessário definir a temperatura do escoamento  $T_0$  e as propriedades dos fluidos como as massas volúmicas  $\rho_G$  e  $\rho_L$ , as viscosidades  $\mu_G$  e  $\mu_L$  e a tensão interfacial  $\sigma$ . Para a geometria da coluna é necessário definir o diâmetro interno  $D$ , o comprimento  $L$  e a rugosidade absoluta,  $\varepsilon$ .

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizou-se um estudo experimental e numérico para validar o modelo de mistura com 30 testes experimentais. Utilizou-se diferentes velocidades superficiais de gás e líquido: 6 velocidades superficiais de líquido  $J_L$  variando de  $1,727 \times 10^{-2}$  m/s até  $10,360 \times 10^{-2}$  m/s; 5 velocidades superficiais de gás  $J_G$  variando de  $1,243 \times 10^{-2}$  m/s até  $2,072 \times 10^{-2}$  m/s.

### 5.1 MAPA DE PADRÕES DE ESCOAMENTO

Como visto na seção 4.2.5, para solucionar o modelo de mistura, primeiro é necessário determinar o padrão ou regime de escoamento a partir das velocidades superficiais, das propriedades físicas dos fluidos e da geometria da tubagem. Utilizaram-se as equações de transição descritas na seção 4.2.2. Na Fig.(5.1) apresenta-se o mapa de padrões de escoamento obtido neste trabalho.

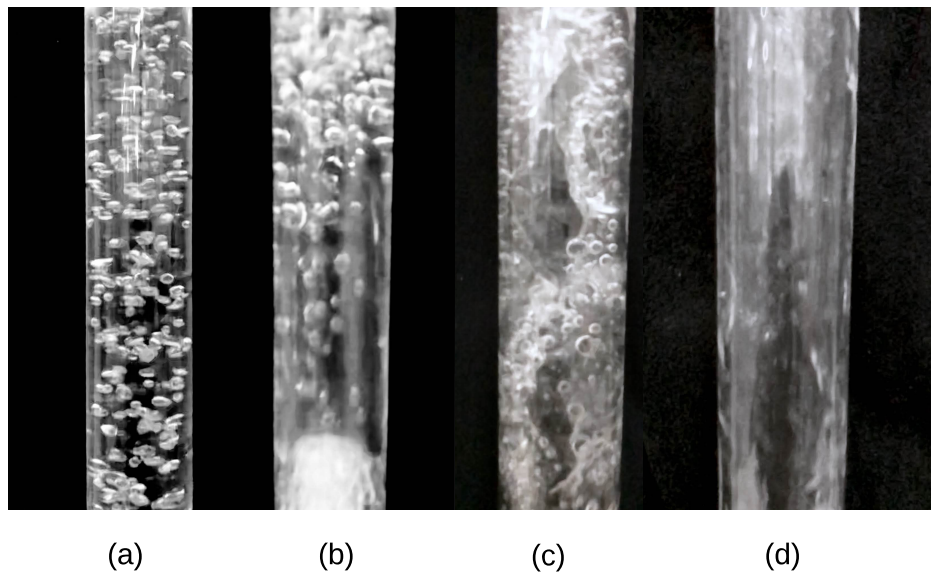


**Figura 5.1:** Mapa dos padrões de escoamento para um sistema ar-água em escoamento vertical ascendente num tubo com 32 mm de diâmetro e localização dos pontos experimentais testados.

Esperava-se um mapa idêntico ao apresentado por Taitel *et al.* (1980), Fig.(4.6), uma vez que utilizaram suas equações de transição. As curvas de transição entre cada padrão de escoamento são descritos pelas equações: Eq.(4.13) - curva A; Eq.(4.14) - curva B; Eq.(4.15) - curva C; Eq.(4.16) - curva D; Eq.(4.17) - curva E.

Observa-se na Fig.(5.1) os 30 pontos experimentais a vermelho utilizados nos testes para aquisição dos dados de diferença de pressão e da fração de vazão. Todos os pontos estão dentro da região de bolhas, uma vez que as velocidades,  $J_G$  e  $J_L$  são baixas. Este padrão de escoamento mostra-se na Fig.5.2(a), e representa uma aglomeração de bolhas que apresentam tamanhos variados, com forma aproximadamente esférica ou distorcida e descrevem trajetórias em ziguezague. As formas e trajetórias das bolhas são resultantes de efeitos de tensão superficial, viscosidade, inércia e impulsão.

Realizou-se também a visualização dos padrões de escoamento por dois métodos: a olho nu e através de uma câmera de alta velocidade. Esses padrões são mostrados na Fig.(5.2).

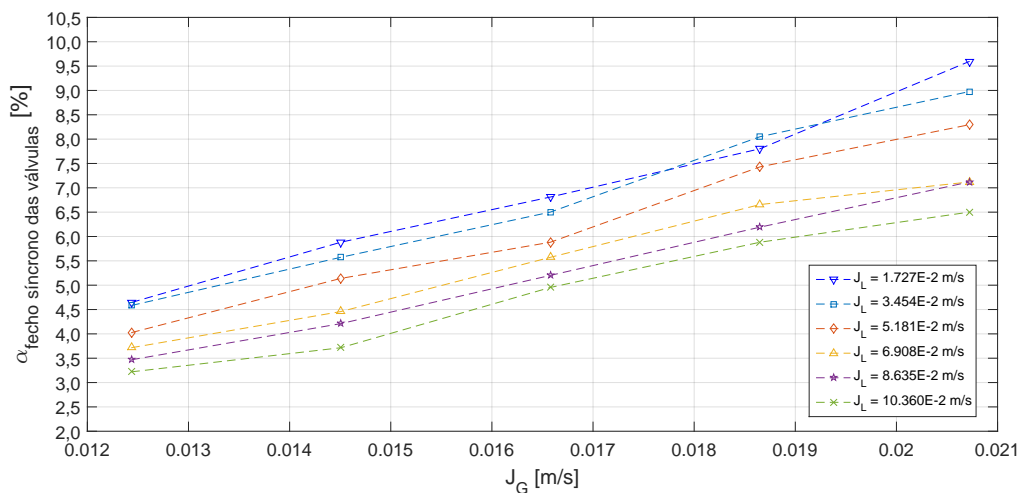


**Figura 5.2:** Padrões de escoamento obtidos na instalação experimental, para um escoamento ar-água ascendente vertical. (a) Bolhas - *Bubble Flow*, (b) Golfadas - *Slug Flow*, (c) Esfarrapado - *Churn flow* e (d) Anular - *Annular flow*.

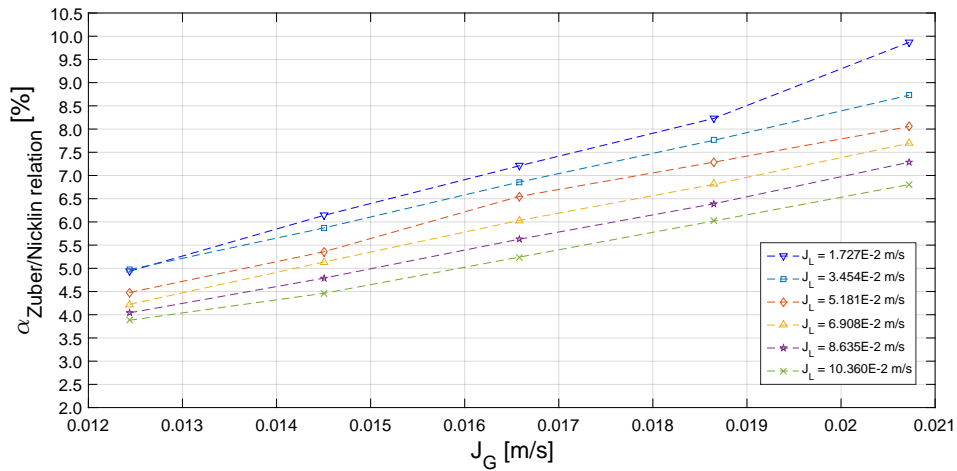
## 5.2 FRAÇÃO DE VAZIO

A análise da fração de vazio foi realizada comparando os dois métodos experimentais descritos na seção 4.1.2, o método do *fecho síncrono das válvulas* e o método da *relação de Zuber/Nicklin*, com os resultados numéricos obtidos a partir do modelo de mistura apresentado na seção 4.2.3.

Os resultados experimentais da fração de vazio obtidos pelos dois métodos são mostrados nas Figs.(5.3) e (5.4), respectivamente, para o método do *fecho síncrono das válvulas* e o método da *relação de Zuber/Nicklin*. Estes dados mostram que para uma velocidade de líquido constante a fração de vazio aumenta com o aumento da injeção de gás. Já para uma velocidade de gás constante e um aumento na velocidade do líquido, a fração de vazio diminui com o aumento da velocidade da mistura,  $J$ . Isto é consequência do aumento da velocidade dos fluidos na coluna: quanto maior a velocidade da mistura, maior será a velocidade das bolhas e menor o tempo de permanência na coluna. Este comportamento foi mencionado por (Nicklin 1962, Wallis 1969) e também observado em todos os resultados numéricos e experimentais. O menor e o maior valor da fração de vazio de vazio experimental obtido pelo método do *fecho síncrono das válvulas* foi, respectivamente, de 3,22% e 9,60%, Fig.(5.3). Já para o método da *relação de Zuber/Nicklin* foram de 3,88% e 9,87%, Fig.(5.4). Estes baixos valores da fração de vazio eram esperados, uma vez que o padrão de escoamento é o *Bubble flow* e a fração de vazio neste escoamento é menor do que 25,00%.



**Figura 5.3:** Resultado experimental da fração de vazio para todas as velocidades  $J_L$  e  $J_G$  testadas - Método do *fecho síncrono das válvulas*.



**Figura 5.4:** Resultado experimental da fração de vazio para todas as velocidades  $J_L$  e  $J_G$  testadas - Método da *relação de Zuber/Nicklin*.

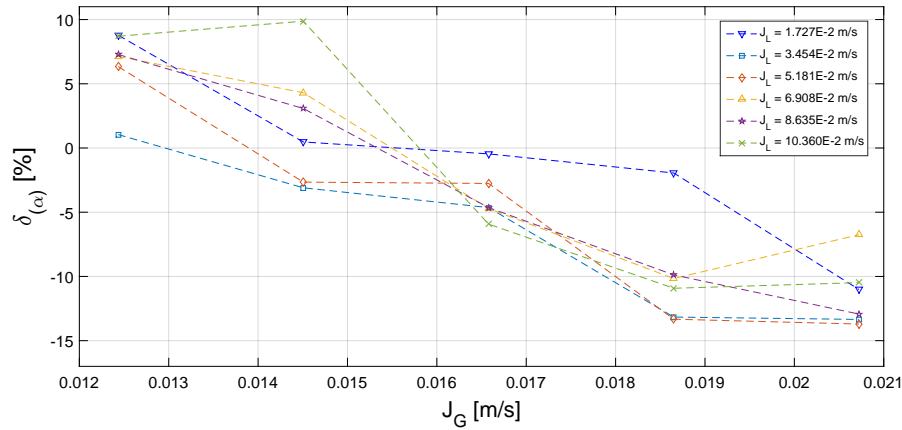
A precisão do modelo analisado é baseada no erro relativo percentual ( $\delta_\Phi$ ), Eq.(5.1), para os 30 pontos experimentais testados.

$$\delta_\Phi = 100 \left[ \frac{\Phi_{num} - \Phi_{exp}}{\Phi_{exp}} \right] \quad (5.1)$$

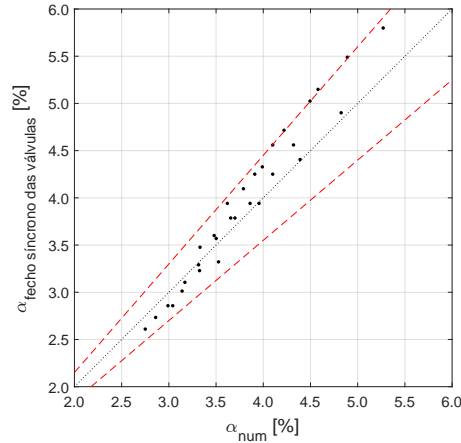
onde  $\Phi$  é uma variável auxiliar que representa,  $\alpha$ , e que também será utilizada para o gradiente de pressão,  $\Delta P/L$ .

O erro relativo percentual da fração de vazio,  $\alpha$ , experimental é apresentado nas Figs.(5.5) e (5.6) para o método de *fecho síncrono das válvulas* e nas Figs.(5.7) e (5.9) para a *relação de Zuber/Nicklin*. Da comparação dos resultados numéricos com os resultados do método do *fecho síncrono das válvulas*, Fig.(5.5), resultou que a média do erro relativo foi de 3,32%; a média do erro relativo para a menor velocidade de gás  $1,451 \times 10^{-2}$  m/s foi de 7,85% e a média do erro relativo para a maior velocidade superficial de gás de  $2,072 \times 10^{-2}$  m/s foi de 13,67%. O desvio padrão do erro relativo foi de 7,53% e o método mostrou uma alta variação do erro com o aumento da velocidade superficial de gás.

Observa-se ainda na Fig.(5.5), que para os baixos valores de velocidade superficial de gás os resultados numéricos subestimaram os resultados em mais de 5% enquanto para altos valores de velocidade de gás os resultados foram sobrestimados em mais de 13%. Este problema deve-se à dificuldade de garantir o fecho manual e síncrono das válvulas localizadas a 1,165 m de distância. E observa-se na Fig.(5.6), que o erro relativo ( $\delta_{(\alpha)}$ ) para a fração de vazio não excedeu 15%.

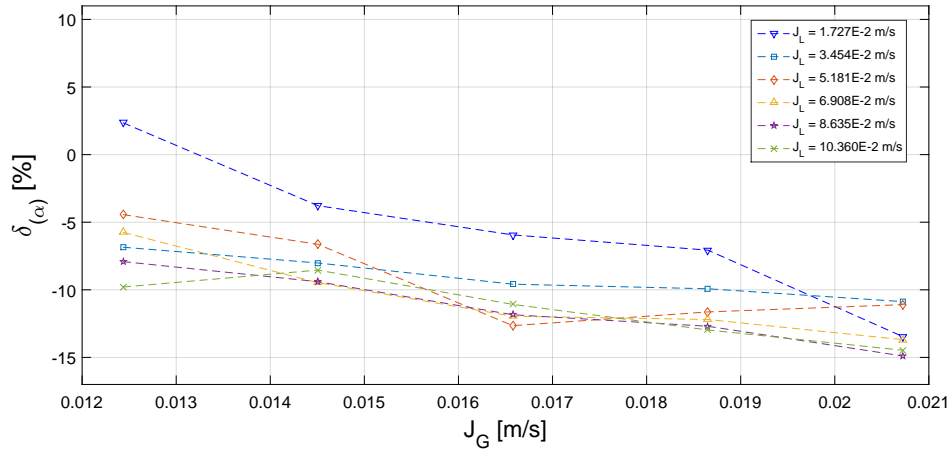


**Figura 5.5:** Resultados para os erros relativos para todos os  $J_L$  testado - Método do *fecho síncrono das válvulas*



**Figura 5.6:** Comparação da fração de vazio,  $\alpha$ , para os resultados experimentais (eixo-Y) contra os resultados numéricos (eixo-X), as linhas pontilhadas vermelhas correspondem um máximo e mínimo de 15% dos erros experimentais - Método do *fecho síncrono das válvulas*

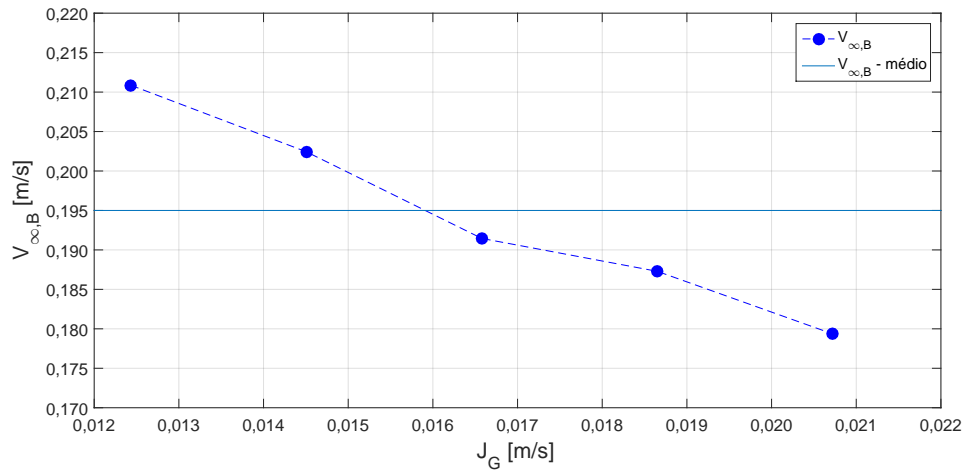
Comparando os resultados numéricos com os resultados experimentais utilizando o método da *relação de Zuber/Nicklin*, Fig.(5.7), resultou um erro médio de 9,54%. O desvio padrão do erro relativo foi menor do que a metade do método de *fecho síncrono das válvulas*, 3,67% contra 7,53%. Com exceção de uma leitura, todos os resultados numéricos sobrestimaram os valores de fração de vazio experimentais e a dispersão dos valores é menor. Para o parâmetro de distribuição das bolhas, requerido neste método, foi considerado  $C_{0,B} = 1$  para os valores experimentais recomendado por (Nicklin 1962, Zuber e Findlay 1965, Pauchon et al. 1994). No entanto este valor foi numericamente calculado para cada de par de velocidades testados, apresentando valores médios de  $C_{0,B,num} = 1,2$ . O erro da fração de vazio experimental foi menor quando se utilizou o valor de  $C_{0,B} = 1$  face ao uso de  $C_{0,B,num} = 1,2$ . Este facto, logo percecionado du-



**Figura 5.7:** Resultados para os erros relativos para todos os  $J_L$  e  $J_G$  testados - Método da relação de Zuber/Nicklin.

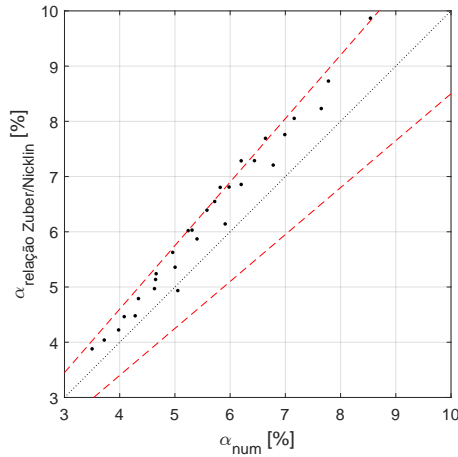
rante as experiências, levou a que se adotasse  $C_{0,B} = 1$  no cálculo da fração de vazio pelo método da relação de Zuber/Nicklin.

Relativamente ao parâmetro  $V_{\infty,B}$ , nos 30 testes experimentais efetuados, obtiveram-se valores entre 0,172 m/s e 0,222 m/s com um valor médio de 0,195 m/s, como se observa na Fig.(5.8). Os valores obtidos de  $V_{\infty,B}$  vão ao encontro do que foi escrito na seção 4.2.3.



**Figura 5.8:** Resultados da velocidade de subida das bolhas em meio estagnado de água,  $V_{\infty,B}$ , utilizado no método da relação de Zuber/Nicklin.

Mostra-se na Fig.(5.9) que o erro relativo ( $\delta_{(\alpha)}$ ) não excedeu o valor de 15% para o método da relação de Zuber/Nicklin.



**Figura 5.9:** Comparação da fração de vazio,  $\alpha$ , para os resultados experimentais (eixo-Y) contra os resultados numéricos (eixo-X), as linhas pontilhadas vermelhas correspondem um máximo e mínimo de 15% dos erros experimentais - Método da *relação Zuber/Nickilin*.

### 5.3 GRADIENTE DE PRESSÃO

A análise do gradiente de pressão foi realizada comparando os resultados numéricos com os resultados experimentais e suas incertezas.

O gradiente de pressão experimental foi obtido a partir da Eq.(4.1), onde a variável  $\Delta h = h_2 - h_1$  é o desnível da água nos dois ramos do manómetro. Com a coluna apenas cheia de água o valor de  $\Delta h$  era nulo. Quando a coluna era alimentada apenas por água verificava-se um aumento no desnível  $\Delta h$ . Contudo, dado que se testaram valores baixos de  $J_L$  o valor de  $\Delta h$  foi sempre reduzido não ultrapassando  $3mm$ . Isto deve-se ao facto de as perdas de carga (por atrito) serem diminutas.

Com a introdução de gás e líquido o valor de  $\Delta h$  aumentava significativamente devido ao aumento do atrito ou fricção. Para um valor fixo de  $J_L$  e com o aumento de  $J_G$  o valor de  $\Delta h$  aumentava e consequentemente  $\Delta P/L$  diminuía, como se comprova pela análise da Eq.(4.1). Esta diminuição do  $\Delta P/L$  pode também ser analisada pela hidrodinâmica aplicando a equação da energia ao escoamento ar-água entre os pontos  $P1$  e  $P2$ , Eq.(5.2).

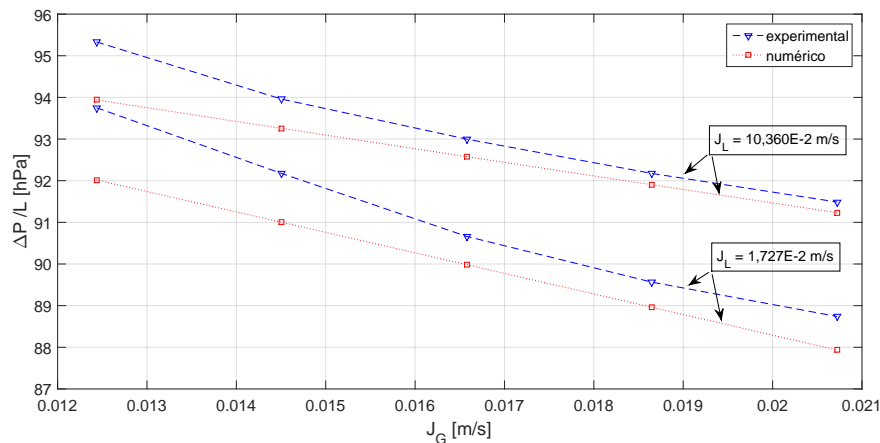
$$\frac{P1 - P2}{L} = \frac{\Delta P}{L} = \rho_m g + \frac{F}{L} \quad (5.2)$$

em que  $\rho_m$  e  $F$  representam, respectivamente, a massa volúmica da mistura e as perdas de carga por atrito. Com o aumento de  $J_G$  aumenta a fração de vazio, diminui  $\rho_m$  e aumenta a perda por atrito  $F$ . Deste modo na Eq.(5.2), a componente da hidrostática (gravitacional) diminui e a componente devido às perdas por atrito aumenta, resultando

numa diminuição do gradiente de pressão. A influência da componente gravitacional é superior a componente da perda de carga,  $F$ , pois este o padrão de escoamento de bolhas é fortemente dependente da componente gravitacional dado que a fração de vazio é baixa, inferior a 25,00% (Lima 2011, Teixeira 1998).

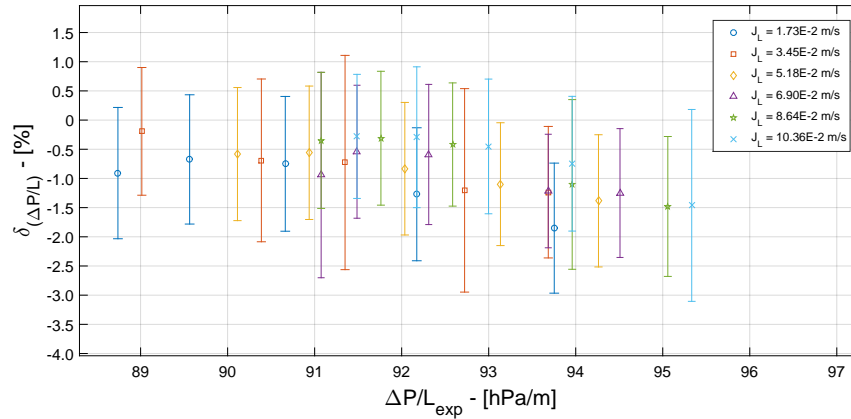
O aumento verificado no gradiente de pressão quando se aumentou a velocidade superficial do líquido,  $J_L$ , para uma velocidade superficial de gás,  $J_G$ , fixa, pode justificar-se analisando também pelas Eqs.(4.1) e (5.2). Analisando pela Eq.(4.1), a diminuição verificada em  $\Delta h$  conduz ao aumento de  $\Delta P/L$ . Na Eq.(5.2) o aumento de  $\Delta P/L$  justifica-se pelo aumento da velocidade da mistura que leva a uma diminuição da fração de vazio e como consequência há um aumento da massa volúmica da mistura,  $\rho_m$ . Consequentemente, com o aumento da massa volúmica da mistura e da componente de atrito,  $F$ , o gradiente de pressão,  $\Delta P$ , também aumenta.

O gradiente de pressão para a menor e a maior velocidade de líquido constantes e com um aumento da velocidade superficial de gás é mostrado na Fig.(5.10). Estas curvas apresentam uma inclinação negativa, ou seja, com o aumento de  $J_G$ , o gradiente de pressão diminui devido a diminuição da massa volúmica da mistura. Tal característica foi observada em todos os resultados experimentais e numéricos. A comparação do erro dos



**Figura 5.10:** Gradiente de pressão Experimental vs Numérico.

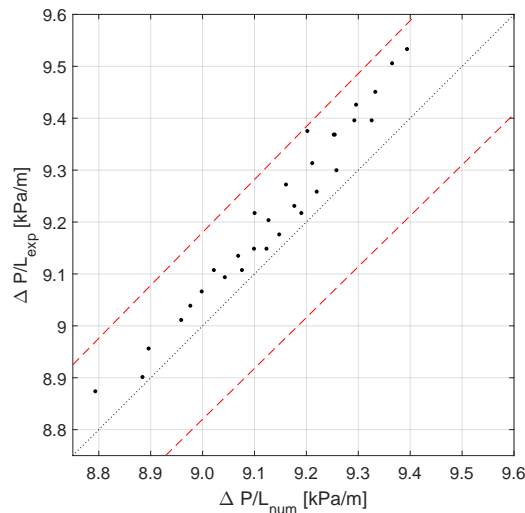
resultados experimentais contra os resultados numéricos do gradiente de pressão, e suas respectivas incertezas das medidas experimentais do gradiente de pressão foram calculadas de acordo com a seção 4.1.3, são mostrados na Fig.(5.11) para todas as velocidades superficiais de líquido e de gás. O desvio padrão do erro relativo do gradiente de pressão foi de 9,20%, mostrando-se um resultado entre o experimental e o numérico estável.



**Figura 5.11:** Erro relativo do gradiente de pressão.

Como mostrado na Fig.(5.12), o erro relativo ( $\delta_{(\Delta P/L)}$ ) para a gradiente de pressão não excedeu 2,00% e a maior incerteza na medição experimental foi de 1,83%. Estes valores baixos eram esperados uma vez que este padrão de escoamento é fortemente influenciado pela força gravitacional, e depende da massa volúmica da mistura e da fração de vazio.

Estes resultados foram esperados uma vez que o modelo de mistura realiza uma boa predição da diferença de pressão para este tipo de escoamento vertical no regime bolhas, demonstrado por (Lima 2011).



**Figura 5.12:** Comparação do gradiente de pressão  $\Delta P/L$  para os resultados experimentais (y-axis) contra os resultados numéricos (x-axis), as linhas pontilhadas vermelhas correspondem um máximo e mínimo de 2% dos erros experimentais.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 CONCLUSÕES

Realizou-se um estudo experimental e numérico sobre escoamento gás-líquido, ar-água, ascendente vertical e foram analisados dois parâmetros: a fração de vazio e o gradiente de pressão. Realizaram-se 30 testes experimentais com 6 velocidades superficiais do líquido variando entre  $1,727 \times 10^{-2}$  m/s e  $10,360 \times 10^{-2}$  m/s, com 5 velocidades superficiais de gás variando entre  $1,243 \times 10^{-2}$  m/s e  $2,072 \times 10^{-2}$  m/s. Os valores experimentais destes dois parâmetros foram comparados com os resultados numéricos obtidos através do modelo de mistura.

Montou-se uma nova instalação experimental para estudo de escoamentos gás-líquido. A partir da nova instalação foi possível obter dados coerentes e confiáveis dos parâmetros estudados. O equipamento experimental permitiu: a observação dos padrões de escoamento a olho nu e também por câmara de alta velocidade; a aquisição do valor da fração de vazio através instalação de válvulas de fecho rápido e da análise da velocidade de subida das bolhas e a aquisição do gradiente de pressão através de um manómetro diferencial.

Observaram-se os 4 principais padrões de escoamentos: *Bubble flow* (Bolhas); *slug flow* (Golfadas); *Churn flow* (Esfarrapado) e *Annular flow* (Anular). Neste trabalho o estudo efetuado limitou-se ao padrão *Bubble flow*. A partir das velocidades das fases, das características dos fluidos e da tubagem, verificou-se o padrão *Bubble flow* em todos os ensaios experimentais.

A fração de vazio experimental foi obtida através de dois métodos: método do *fecho síncrono das válvulas* e o método da *relação de Zuber/Nicklin*. Ambos os métodos foram coerentes e aceitáveis. O método do *fecho síncrono das válvulas* apresentou um erro médio relativo de 3,32% com um desvio padrão de 7,53% e com valores de fração de vazio mínimo de 3,22% e máximo de 9,60%. Já o método da *relação de Zuber/Nicklin* apresentou um erro médio de 9,54% com um desvio padrão de 3,67%, com valores mínimo

da fração de vazio de 3,88% e máximo de 9,87%. Estes valores de erro são aceitáveis, devido às condições realizadas e à metodologia utilizada.

A análise do gradiente de pressão foi realizada comparando os resultados do modelo de mistura com os resultados obtidos através do manómetro diferencial. O método utilizado para mensurar o gradiente de pressão experimental mostrou-se simples e confiável, não recorrendo a nenhum sensor eletrónico, desde que seu manuseio seja correto. Com os resultados experimentais foi possível validar o modelo numérico, utilizando o modelo de mistura. O valor do gradiente de pressão para as menores velocidades superficiais foi de 8,87 kPa/m e para as maiores velocidades superficiais foi de 9,54 kPa/m. A precisão do modelo foi analisada a partir dos erros percentuais que não excederam 2,00%, com o maior valor de incerteza na medição de 1,83% e com um desvio padrão de 9,20%.

## 6.2 TRABALHOS FUTUROS E MELHORAS NA INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

A instalação experimental montada mostrou-se capaz de avaliar dois parâmetros importantes para os escoamentos bifásicos, porém a precisão dos resultados experimentais poderia ser melhorada.

O método do *fecho síncrono das válvulas* foi eficaz e simples, mas sua precisão poderia ser melhorada com válvulas solenóides (eletroválvulas) para garantir o fecho simultâneo por apenas um operador. Já para a fração de vazio utilizando o método da *relação de Zuber/Nicklin* também poderia ser melhorado alterando o procedimento de medição: de uma medição manual com um cronómetro do tempo de subida das bolhas por um sensor eletrónico/óptico de velocidade.

A medição do gradiente de pressão é simples e confiável, desde que seu manuseio seja correto. Caso contrário,  $\Delta P/L_{exp}$  não será preciso. Sendo assim, a substituição do manómetro diferencial por sensores de pressão eletrónicos é conveniente.

Observou-se que o rotâmetro de gás, R3 na Fig.4.1(a), é mais preciso quando opera aproximadamente no meio de sua escala. Uma consequência visual é o erro relativo percentual do  $\Delta P/L$  ser menor quando o rotâmetro de gás opera no meio de sua escala, independente da caudal de líquido, secção 5.3. A substituição deste rotâmetro de gás por um medidor eletrónico resultaria em caudais de gás mais precisos e consequentemente menores erros nas velocidades superficiais de gás,  $J_G$ , valor de entrada do modelo numérico.

Como trabalho futuro pode-se também analisar os mesmos parâmetros e outros,

por exemplo a transferência de massa entre as fases, no estudo das várias configurações de escoamento gás-líquido em regime *Bubble flow*, mas também noutros regimes como, *Slug flow*, *Churn Flow* e no *Annular flow*.

## PARTE II

# PLATAFORMA METÁLICA

## 1 INTRODUÇÃO

A Parte II desta dissertação é o estudo realizado do processo de adaptação e reconstrução da plataforma metálica para auxílio no manuseio da instalação experimental de escoamento bifásico.

### 1.1 OBJETIVOS

O principal objetivo da reconstrução desta plataforma metálica é garantir um manuseio seguro dos diversos elementos da instalação experimental, nomeadamente válvulas, mangueiras e sensores. Para isso, realizaram-se simulações numéricas com o auxílio do *software* ANSYS® com base na norma ISO-14122. As recomendações do fabricante de parafusos (Intec 2003) foram incorporadas nas simulações de verificação do correto, e seguro, comportamento da plataforma.

### 1.2 HISTÓRICO DA PLATAFORMA

A plataforma metálica estava instalada no laboratório de de Materiais de Construção Mecânica (LMCM) do IPB. Na época, a plataforma serviu de base para os estudos experimentais de dois doutoramentos: Teixeira 1998 e Garcia 2005. Por volta do ano de 2010, a plataforma foi desmontada e suas partes, piso, escadas, colunas, guarda-corpo e corrimão e foram armazenadas. O Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica (LMFH) recebeu uma nova plataforma através da adaptação do modelo anterior que se encontrava ainda desmontado. As principais alterações na plataforma para o novo espaço do LMFH foram no piso e na altura. Foram feitos também 4 estudos de apoios para a situação de estabilização da plataforma junto à parede de alvenaria.

### 1.3 ESTRUTURA DA PARTE II

Esta Parte II está dividida em 5 capítulos e o primeiro capítulo é a Introdução. Na introdução são apresentadas os objetivos e o histórico da plataforma.

O segundo capítulo é a Fundamentação Teórica. Na fundamentação teórica apresenta-se a base da análise estrutural utilizando o método de elementos finitos. Comenta-se também sobre a geometria e a malha dos componentes, os materiais e suas propriedades mecânicas. Conclui-se com um breve comentário sobre os coeficientes de segurança.

O terceiro capítulo correspondente aos Materiais e Métodos. Nesta seção apresenta-se uma situação prévia sobre o histórico da plataforma, as considerações do projeto como a carga utilizada e o local da instalação. Uma tabela das propriedades dos materiais e os procedimentos da simulação no ANSYS® completam este capítulo.

No quarto capítulo apresenta-se os Resultados e Discussões. Os resultados das simulações numéricas dos suportes propostos, bem como a análise das tensões e deformações da plataforma são descritos e avaliados. A escolha da solução mais adequada ao problema relativo à colocação de apoios numa parede de alvenaria desligada seguiu as recomendações dos fabricantes de parafusos correspondendo à solução de um caso especial.

Sumariam-se no quinto capítulo as Conclusões do projeto. Os requisitos propostos foram atingidos e a plataforma permitiu todo o trabalho experimental apresentado na Parte I desta dissertação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 ANÁLISE ESTRUTURAL

Existem várias análises estruturais como a análise modal, estática, harmônica, dinâmica transiente, entre muitas. O presente trabalho restringe-se à aplicação do método de elementos finitos (MEF) numa situação de análise estrutural estática.

A análise estrutural estática calcula os efeitos das condições de carregamento estático na estrutura, ignorando efeitos de inércia e amortecimento, devido a ação de cargas que variam em função do tempo. No entanto, a análise estática inclui cargas de inércia estática como a aceleração da gravidade.

A análise estática pode ser usada para determinar os deslocamentos, tensões, deformações específicas e forças nas estruturas ou componentes causadas por cargas que não induzem efeitos consideráveis de inércia ou amortecimento (Azevedo 2015). Assume-se que os carregamentos estáticos e as respectivas respostas são aplicados lentamente em relação ao tempo. Os tipos de esforços que podem ser aplicados a análise estática são:

1. Forças e pressões aplicadas externamente;
2. Forças inércia estáticas (aceleração da gravidade);
3. Aplicação de deslocamentos diferentes de zero.

Além dos carregamentos estáticos, ou seja, que não variam com o tempo, pode-se aplicar cargas estáticas que são repetitivamente retiradas total ou parcialmente e criam ciclos de tensões ao longo do tempo de maneira alternada. Sabe-se que tais variações cíclicas de tensões causam fadiga nos materiais e falhas catastróficas, mesmo quando as tensões são inferiores aos limites para condições puramente estáticas (Azevedo 2015).

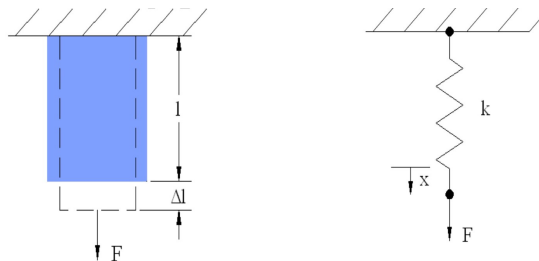
Neste trabalho não serão consideradas as variações cíclicas aplicadas à estrutura, uma vez que a mesma é hiperestática e que as forças envolvidas são muito inferiores as do limite de cedência.

## 2.2 MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS

O método de elementos finitos é uma ferramenta utilizada para facilitar a análise, neste caso, estrutural da plataforma montada. Este método permite a simulação numérica da estrutura, resultando nas tensões e deformações devido as cargas aplicadas. A vantagem da simulação numérica é a rapidez e facilidade de reproduzir várias situações de carga.

Para aplicar o método de elementos finitos (MEF) é necessário primeiramente um desenho em algum software como SolidWorks ou Inventor para definir os domínios da geometria, mas também simular a utilização das peças ou conjuntos nas condições de utilização. Esta geometria da peça, que é originalmente continua, é subdividida pelo programa de análise, em pequenos elementos, numa quantidade finita, mantendo-os interligados por nós, formando a malha. Este processo é denominado de discretização (Azevedo 2015).

Na análise estrutural com MEF cada um dos elementos é interpretado como uma mola que possui rigidez e tamanho predeterminado, mostrado na Figura 2.1.



**Figura 2.1:** Similaridade entre um elemento e uma mola carregados axialmente.

**Fonte: (Azevedo 2015)**

Sendo assim, pode-se aplicar as equações da mecânica geral para um carregamento axial. As principais equações para esse tipo de carregamento são: tensão axial ( $\sigma$ ), deformação ( $\epsilon$ ) e módulo de Young (módulo de elasticidade) ( $E$ ), respectivamente mostradas nas Eqs.(2.1), (2.2) e (2.3).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

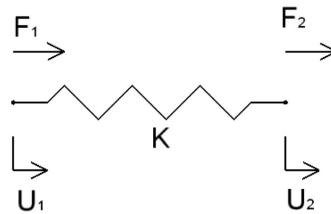
$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.3)$$

A partir dessas equações é possível identificar a similaridade entre a força aplicada a um elemento e a força aplicada a uma mola, mostrada na Equação (2.4).

$$F = \left( \frac{E.A}{L} \right) . \Delta L \quad \text{é similar a} \quad F = k.x \quad (2.4)$$

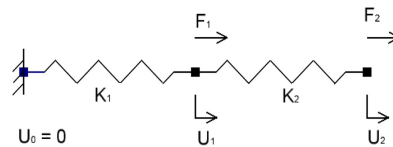
Da formulação do MEF cada um dos elementos é analisado como se fosse uma mola, Fig.(2.2), e contribui para a formação das matrizes nos termos de carregamento, deslocamento e rigidez. A rigidez dessa mola depende das propriedades do material e geometria da peça como anteriormente mostrado.



**Figura 2.2:** Deslocamento e forças nas extremidades de uma mola.

**Fonte: (Azevedo 2015)**

A matriz global é formada pelo conjunto dos elementos através dos nós comuns a eles. A Fig.(2.3) mostra um sistema com dois elementos, unidos por nós, em que cada elemento tem um grau de liberdade (deslocamento horizontal).



**Figura 2.3:** Dois elementos ou molas de série com rigidez, deslocamentos e forças diferentes.

**Fonte: (Azevedo 2015)**

As condições de contorno globais (cargas e apoios) são aplicadas aos nós. O sistema de molas da Fig.2.3 pode ser representado por uma equação matricial Eq.(2.5).

$$\begin{pmatrix} F_0 \\ F_1 \\ F_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_1 & -K_1 & 0 \\ -K_1 & -K_1 - K_2 & -K_2 \\ 0 & -K_2 & K_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_0 \\ U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Após discretização da geometria, o programa poderá então, durante a análise, gerar o sistema de equações matricial com os vetores e matriz de rigidez para calcular

o deslocamento de cada um dos nós e as tensões naqueles pontos. Quando o nó de um elemento tiver mais do que um grau de liberdade torna-se necessário o cálculo para cada grau de liberdade. Programas como o ANSYS<sup>®</sup> permitem uma discretização automática. A forma dos elementos (triangular, quadrilateral, piramidal) dependerá da geometria do sistema e das configurações estabelecidas pelo utilizador no software.

### 2.3 A GEOMETRIA E MALHA DOS COMPONENTES

A geometria estudada foi tridimensional permitindo até seis graus de liberdade para cada nó de cada elemento. Elemento é a menor parte da geometria, que dividida, compõe a malha. O nó é aquele que une cada elemento e pode também, eventualmente, estar sobre ele (Azevedo 2015).

Após a discretização, tornam-se conhecidas as quantidades e tipos de elementos e nós. A discretização, com a definição de forma, tamanho, posição e quantidade de elementos pode ser determinada pelo utilizador e executada por um software específico que realizará a análise. Os nós estarão sempre localizados nas extremidades das arestas e, eventualmente, sobre as arestas ou faces do elemento.

As formas e tamanhos de cada elemento, depende da geometria do modelo. Os elementos mais comuns são as barras para geometrias unidimensionais, os elementos triangulares e quadrilaterais para geometrias bidimensionais e, para os problemas tridimensionais, as formas piramidais, tetraédricas e hexaédricas.

Os cálculos feitos através do MEF são realizados pelo programa para cada nó do modelo. Quanto mais nós, mais cálculos são feitos, ou seja, mais tempo de processamento será necessário.

Os resultados obtidos com o MEF podem-se aproximar bastante do resultado analítico e exato. Mas o próprio resultado analítico, assim como, o MEF pode não ser igual ao que ocorre na realidade, pois pode haver diferença nas propriedades do material, geometria e carregamentos. Por exemplo, os materiais, em geral, não são homogéneos como se supõe nos cálculos analíticos ou com o MEF e, portanto, suas propriedades variam internamente. Isto ocorre devido aos seus processos de fabricação, tais como: fundição, forjamento, maquinagem, tratamentos térmicos, etc.

## 2.4 MATERIAL DOS COMPONENTES

As propriedades do material definem as características estruturais de cada componente para uma simulação. E cada simulação pode ter um conjunto diferente de materiais para qualquer componente. As propriedades mais importantes na análise estrutural são o módulo de Young ( $E$ ) o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) e os limites elásticos ( $\sigma_{ced}$ ) e de resistência do material (Azevedo 2015). O módulo de Young ( $E$ ) é uma razão entre a linear entre a tensão ( $\sigma$ ) e a deformação ( $\epsilon$ ) dentro da região elástica de um material, num mesma direção. Esta grandeza indica a rigidez de um material, por exemplo o aço, tem um alto valor de  $E$  ( $E_{aço} = 200$  GPa). O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é uma relação entre as deformações longitudinais e laterais, quando uma carga axial de tração é exercida sobre um corpo deformável que não apenas se alonga, mas também se contrai lateralmente (Hibbeler 2009).

## 2.5 COEFICIENTES DE SEGURANÇA E NORMAS DE PROJETO

Adotam-se os coeficientes ou fatores de segurança por vários motivos, entre eles, as possíveis diferenças entre as propriedades dos materiais previstos em projeto e os realmente utilizados, diferenças entre as condições ambientais quando os materiais foram testados e aqueles em que serão utilizados e as existentes quando em utilização bem como as variações de tensões devidos aos processos de fabrico.

Eventuais diferenças entre o que se prevê no projeto e aquilo que efetivamente ocorre na vida útil do sistema aumentam as possibilidades de falha ou ruína.

Existem vários tipos de falhas ou ruínas: por cedência, rotura e por deformação elástica excessiva. A ruína por cedência ou deformação plástica ocorre quando a tensão aplicada em alguma zona do componente é maior do que o limite elástico do material. Ou seja, as solicitações aplicadas causaram localmente tensões e deformações já no domínio plástico do material, o que não é aceitável uma vez que a cedência provoca uma mudança permanente, que impede normalmente, o funcionamento adequado da peça.

Num metal dúctil, como o utilizado nesta plataforma, submetido a solicitações estáticas à temperatura ambiente, a cedência raramente provoca rotura, pois o material vai encruando ou endurecendo à medida que se deforma, sendo necessário aumentar a tensão para prosseguir a deformação. Ou seja, a ruína por deformação plástica depende assim essencialmente da resistência do material num estado uniaxial de carga (Branco 1989).

O dimensionamento à resistência de um corpo elástico consiste em estabelecer as dimensões do corpo de tal modo que em todos os pontos se deve verificar a seguinte desigualdade

$$\bar{\sigma} < \sigma_{adm} \quad (2.6)$$

onde  $\bar{\sigma}$  é a tensão de comparação e  $\sigma_{adm}$  é a tensão admissível do material. A tensão de comparação,  $\bar{\sigma}$ , é a máxima tensão atuante na peça, a mesma depende do estado de tensão atuante e do critério de cedência. A tensão admissível,  $\sigma_{adm}$ , funciona como uma tensão de segurança em relação à ruína por cedência. O seu valor será inferior à tensão de cedência ou à resistência à tração do material. Quanto menor for a tensão admissível relativamente às tensões características do material, maior será a segurança do dimensionamento. A tensão admissível é dada por:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{ced}}{n} \quad (2.7)$$

onde  $\sigma_{ced}$  é a tensão de cedência do material e  $n$  é coeficiente de segurança em relação à ruína por cedência.

Após realizada a análise, comparam-se os fatores de segurança da análise efetuada com o *software* com os do projeto. Se o fator da análise for superior ao fator do projeto significa que as tensões na peça serão inferiores às tensões admissíveis e, portanto, o projeto estará aprovado. Entretanto, se o fator da análise for inferior ao do projeto, deverá ser reprovado. Na reprovação do projeto deve-se realizar uma análise crítica das variáveis que influenciam nos resultados, tais como, materiais, geometria, apoios ou carregamentos.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 SITUAÇÃO PRÉVIA

A plataforma esteve montada no laboratório LMCM no IPB e foi utilizada como base de estudos experimentais para dois doutoramentos, Teixeira 1998 e Garcia 2005. Por volta de 2010, a plataforma foi desmontada e suas partes e peças armazenadas. Realizou-se o projeto de adaptação para o Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica, a partir da plataforma desmontada. As principais adaptações foram no corte do piso, na altura da plataforma e no sistema de fixação. Os procedimentos efetuados para esta adaptação serão mostrados a seguir.

#### 3.2 CONSIDERAÇÕES DO PROJETO

Realizou-se a análise estática da plataforma com o *software* ANSYS<sup>®</sup> e os cálculos analíticos com o *software* Mathcad e Excel. As seguintes considerações de projeto foram assumidas:

1. A carga distribuída de 300 kg sobre a plataforma foi aplicada;
2. As influências ambientais não foram consideradas, como o vento, uma vez que a plataforma está localizada dentro do Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica;
3. A instalação da plataforma será permanente;
4. Os parafusos de fixação dos suportes de apoio à parede (suportes 1 e 2) foram calculados a partir dos resultados das forças de reação obtidos pelo ANSYS<sup>®</sup>;

Estas considerações são utilizadas como base para as simulações e cálculos dos parafusos.

### 3.3 MATERIAIS

As propriedades dos materiais utilizados na plataforma são descritos na Tabela 3.1. Para a análise estrutural defini-se o material utilizado e suas propriedades mecânicas como o tensão de cedência,  $\sigma_{ced}$ , o módulo de Young,  $E$ , a massa volúmica,  $\rho$ , e o coeficiente de Poisson,  $\nu$ . Não foi possível identificar o tipo de metal da estrutura através de documentação uma vez que os materiais foram adquiridos há mais de 20 anos. Assumindo-se então que o material é aço corrente do tipo SAE-1020 e SAE-1045.

**Tabela 3.1:** Características dos materiais dos componentes da plataforma.

Descrição	Material	$S_Y [MPa]$	$E [GPa]$
Base Plataforma	Aço SAE 1020	350	205
Colunas	Aço SAE 1020	350	205
Escada	Aço SAE 1020	350	205
Corrimão e Guarda-corpo	Aço SAE 1020	350	205
Suporte 1 - Chapa 3mm	Aço SAE 1020	350	205
Suporte 2 - Chapa 3mm	Aço SAE 1020	350	205
Viga Quadrada (400 x 50 x 50 x 3mm)	Aço SAE 1045	450	190

### 3.4 ANÁLISE ESTRUTURAL - ANSYS®

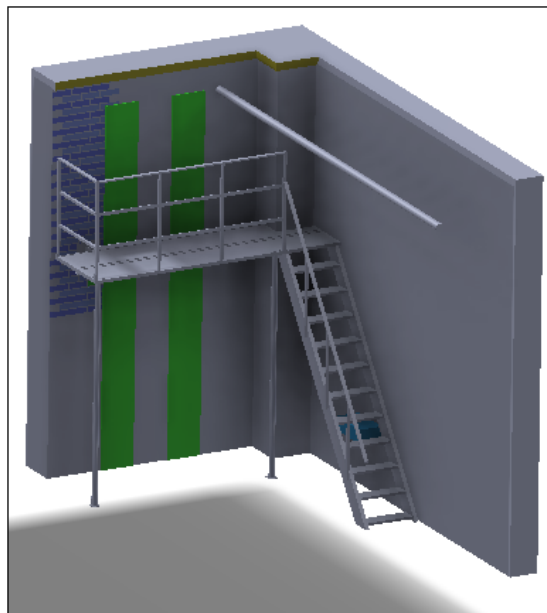
Descreve-se neste capítulo os procedimentos e a configuração de simulação efetuadas no ANSYS®. As considerações do projeto, secção 3.2, e as propriedades dos materiais, secção 3.3, são aplicadas nesta análise estrutural estática, que se pode dividir em 5 etapas:

1. Definição da malha;
2. Definição dos contactos;
3. Pré-análise - carregamento externo dos parafusos;
4. Definição das condições de contorno;
5. Procedimento de simulação, sequência da aplicação das cargas.

Utilizou-se um material isotrópico elástico. O módulo de elasticidade é de 200 GPa e um módulo de Poisson é igual a  $\nu = 0,3$ . A Fig.(3.1) mostra o modelo 3D da plataforma usado nas simulações no ANSYS® e a Fig.(3.2) mostra o modelo da plataforma 3D no novo local de implementação.



**Figura 3.1:** Modelo 3D da plataforma no ANSYS®.



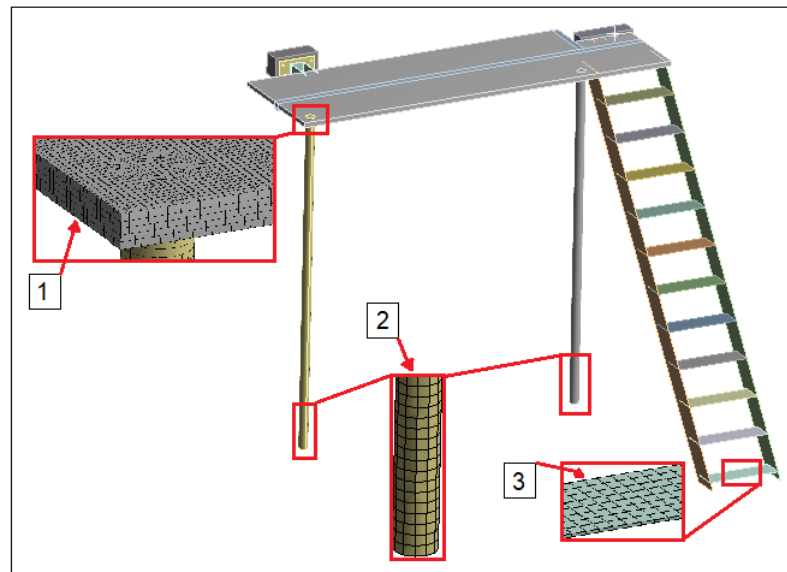
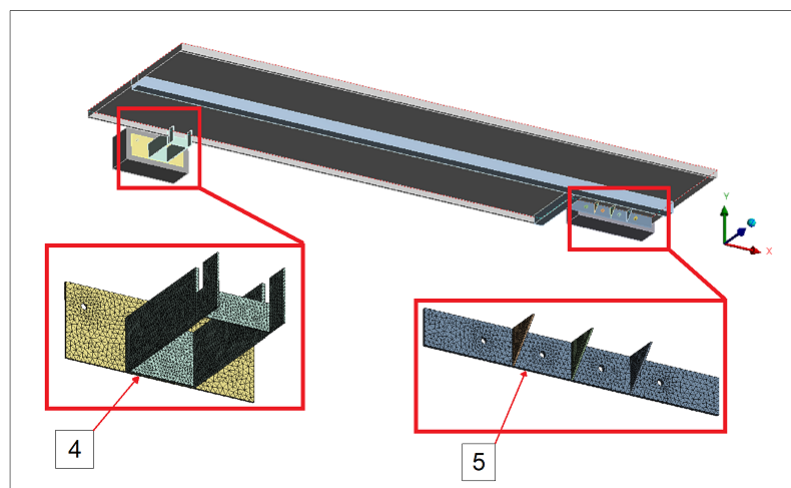
**Figura 3.2:** Modelo 3D da plataforma no novo local de instalação.

#### 3.4.1 MALHA

As malhas utilizadas para a análise, Figs.(3.3) e (3.4), foram constituídas por elementos quadrilaterais. A geometria da malha no piso da plataforma (1), nas colunas (2) e na escada (3) encontra-se discriminada na Fig.(3.3). O refinamento da malhas nas colunas e na escada não foi elevado, uma vez que o esforço nestas partes não é crítico. Observa-se a malha no suporte 1 (item 4) e no suporte 2 (item 5), fig.(3.4), o elevado refinamento nestas partes por serem componentes estruturais críticos para a fixação segura da plataforma. O tamanho dos elementos em cada parte da estrutura é na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2:** Descrição e tamanho dos elementos da malha.

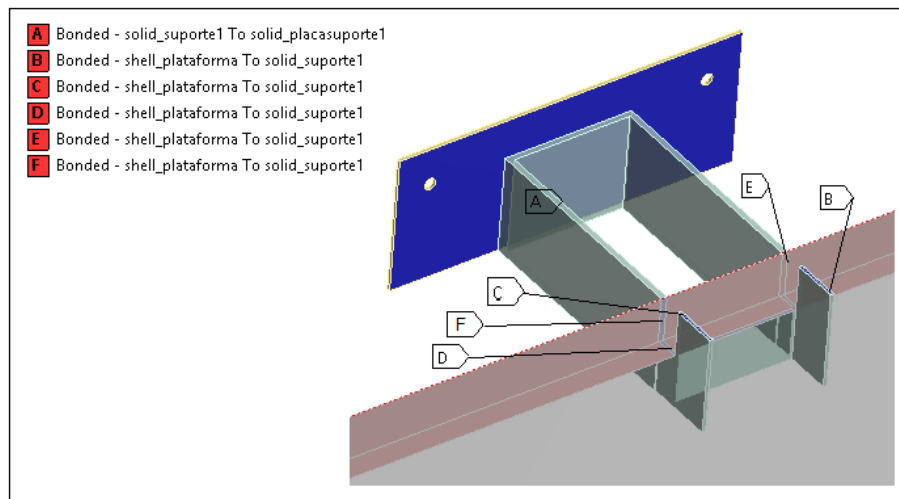
n° Item	Elementos da plataforma	Tamanho dos elementos [mm]
1	Piso da plataforma	0,8
2	Colunas	50,0
3	Escada	50,0
4	Suporte 1	0,5
5	Suporte 2	0,3

**Figura 3.3:** Perspetiva da plataforma com pormenores da malha no Piso da plataforma (1), colunas (2) e escadas (3).**Figura 3.4:** Malha detalhada e refinada nos suportes 1 e 2, respectivamente elementos constituintes da plataforma n°4 e 5.

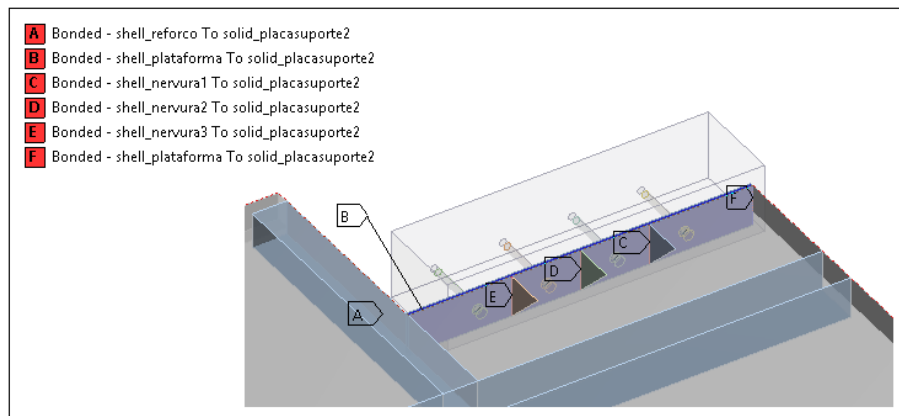
### 3.4.2 CONTACTOS

Uma das condições de contorno a serem definidas na análise é o contacto entre as peças. E de todas as condições de contorno existentes aplicadas a um conjunto de peças, aquilo que mais influencia os resultados obtidos é o tipo de contacto (Azevedo 2015). Na análise da plataforma foram utilizados dois tipos de contactos: *Bonded* (ligado/colado) e o *Frictional* (contacto com atrito).

O contacto *Bonded* permite que não ocorra nenhum deslizamento ou separação das faces ou arestas. Sendo assim, resulta numa solução linear uma vez que o contacto não mudará durante a aplicação da carga. Os contactos *Bonded* foram usados nos suportes 1 e 2 na fixação da base da plataforma, Figs.(3.5) e (3.6). Essas peças foram soldadas ao piso durante a instalação sendo uma das especificações dos contactos tipo *Bonded*.



**Figura 3.5:** Contactos do tipo *Bonded* - Suporte 1.

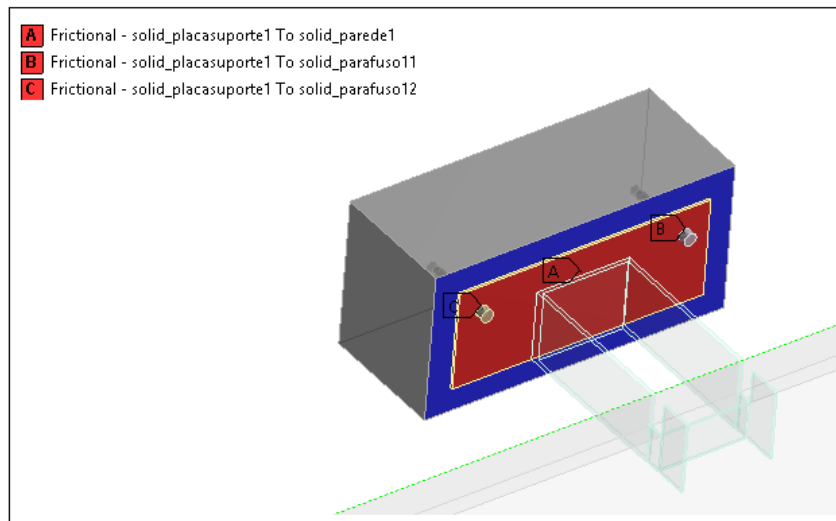


**Figura 3.6:** Contactos do tipo *Bonded* - Suporte 2.

Os contactos *Friction* permitem suportar tensões de corte até certo valor na

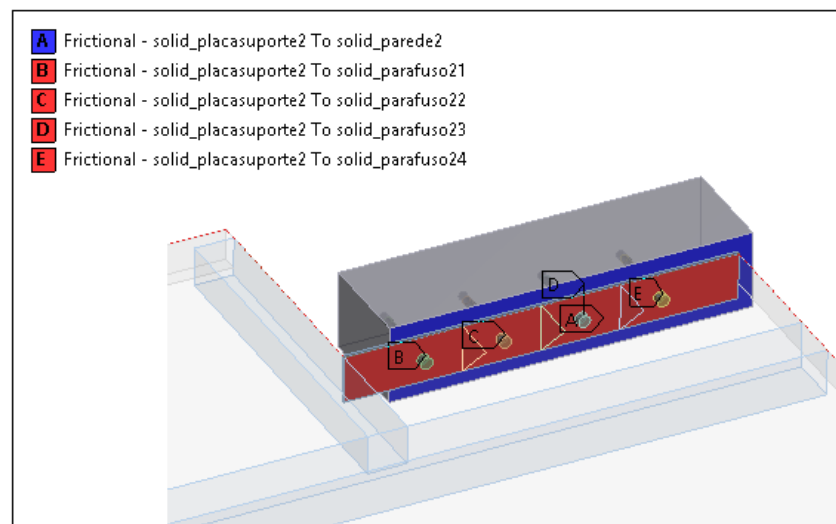
interface antes de começar haver deslizamento entre superfícies. O coeficiente de atrito adotado para as simulações foi de 0,1.

Para o suporte 1 os contactos *Friction* são: entre o Suporte 1 e a parede (A), entre o Suporte 1 e o parafuso direito (B) e entre o Suporte 1 e o parafuso esquerdo (C), Fig.(3.7).



**Figura 3.7:** contactos do tipo *Friction* - Suporte 1.

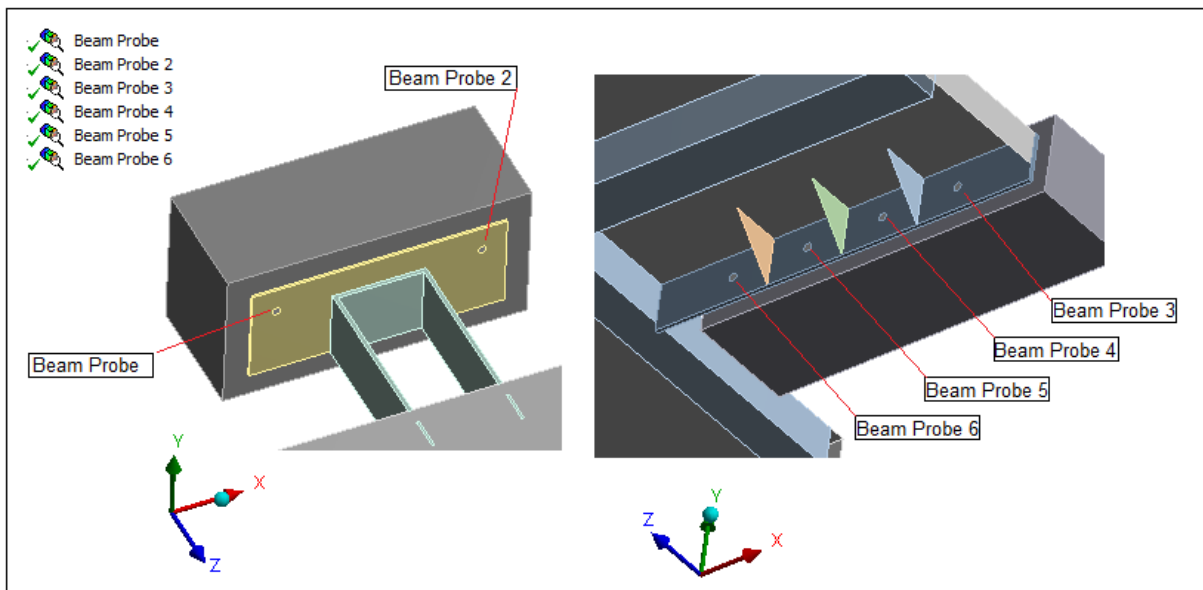
Para o suporte 2 os contactos *Friction* são: entre o Suporte 2 e a parede (A), e entre o Suporte 2 e os parafusos de fixação (B) a (E), Fig.(3.8).



**Figura 3.8:** contactos do tipo *Friction* - Suporte 2.

### 3.4.3 PRÉ-ANÁLISE - CARREGAMENTO EXTERNO DOS PARAFUSOS

Efetuu-se uma análise preliminar substituindo os parafusos por elementos de viga, para obter a carga máxima externa nos parafusos, Fig.(3.9). O valor obtido foi utilizado como dado no cálculo dos parafusos de fixação dos suportes 1 e 2. Exceptuando a pré-carga dos parafusos, tanto a análise preliminar com os elementos de viga, como a análise com os parafusos usaram os mesmos parâmetros de simulação: condições fronteira, contactos, carregamentos e malha.



**Figura 3.9:** Elementos de viga.

As forças de reação em cada elemento de viga são mostradas na Tabela 3.3. O maior valor da força de reação no suporte 1 é igual à 1,554 kN e no suporte 2 é igual a 2,140 kN. Estes valores foram usados nos cálculos analíticos da resistência dos parafusos.

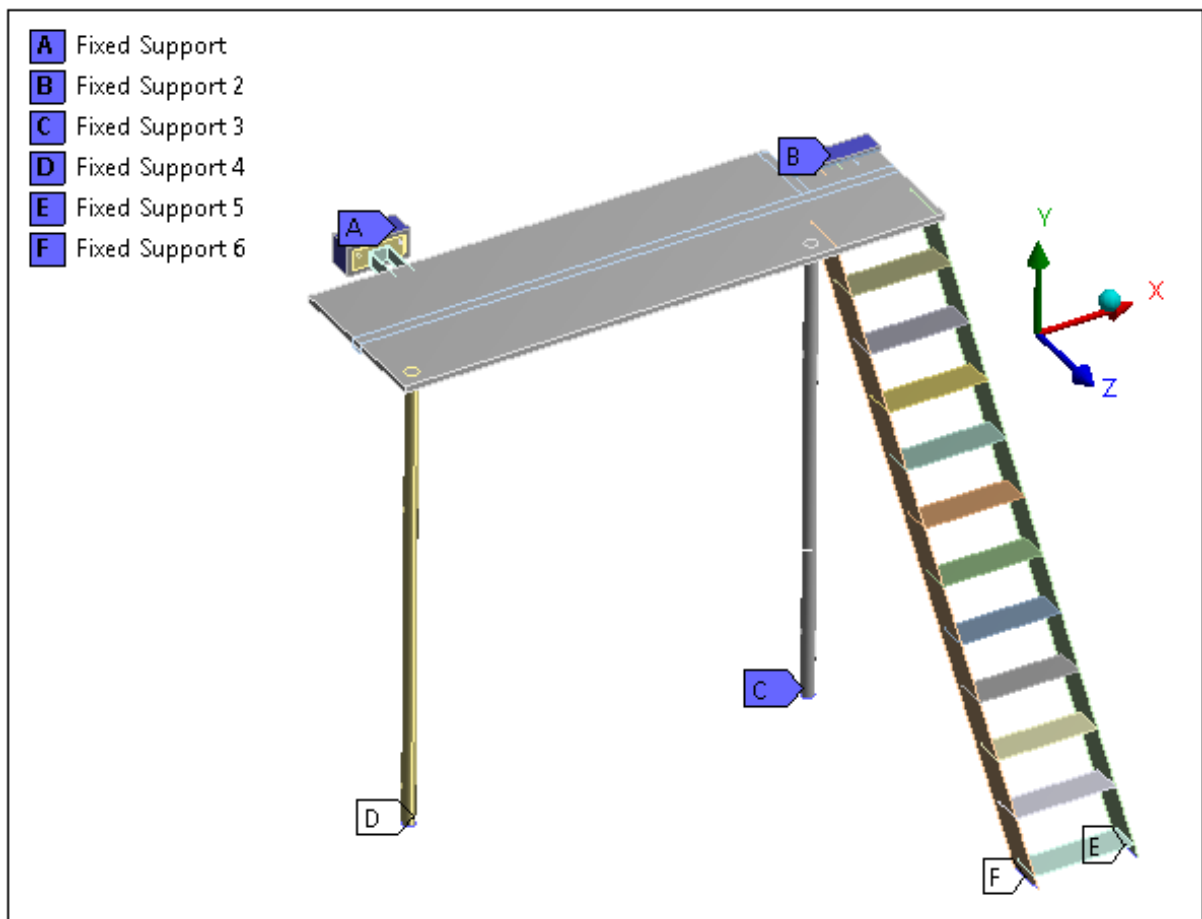
**Tabela 3.3:** Forças de reação nos elementos de viga.

Descrição	Reação - Axial [kN]
Beam Probe	1,504
Beam Probe2	1,554
Beam Probe3	0,281
Beam Probe4	0,811
Beam Probe5	1,393
Beam Probe6	2,140

### 3.4.4 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Na análise estrutural, as condições de contorno são os carregamentos, as restrições, cargas ou tipos de contactos. Ao se definir uma peça ou um conjunto de peças montadas para análise, existem várias condições e procedimentos preparatórios para análise, denominadas condições de contorno que pertencem a fase da análise (Azevedo 2015).

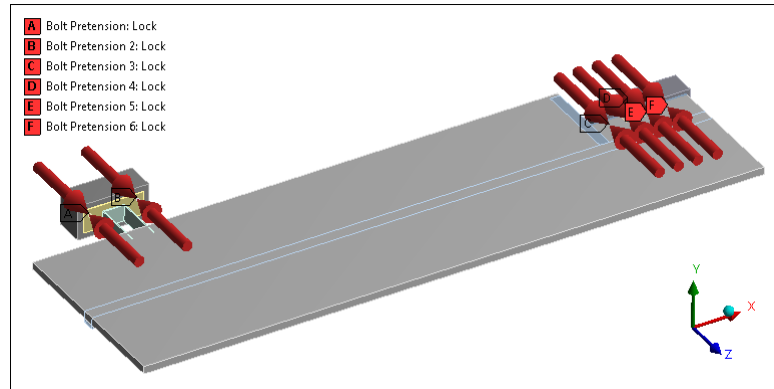
Uma das condições de contorno utilizada foi *Fixed Support* (Apoio Fixo) no qual restringe todos os graus de liberdade das superfícies dos elementos. No entanto a aplicação de apoios fixos em arestas ou vértices não é uma opção ideal porque conduz à concentrações de tensões. As arestas e vértices (A) e (B), Fig.(3.10), aplicados para esta condição de contorno representam na prática os tijolos da parede do laboratório. E as faces e arestas (C), (D), (E) e (F) representam a fixação da base das colunas e da escada com o pavimento do laboratório.



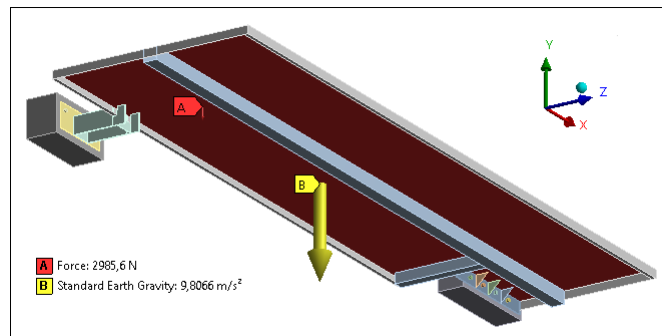
**Figura 3.10:** Condição *Fixed Support*.

### 3.4.5 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

A simulação foi dividida em duas partes: a primeira onde se aplicou uma pré-tensão de 22,4 kN nos parafusos de fixação entre a plataforma e a parede, Fig.(3.11); a segunda onde se aplicou a carga de 300 kg distribuída sobre o piso da plataforma, Fig.(3.12). Em ambas as partes foi considerada uma aceleração da gravidade de  $9,81 \text{ m/s}^{-2}$ .



**Figura 3.11:** Pré-carga nos Parafusos.

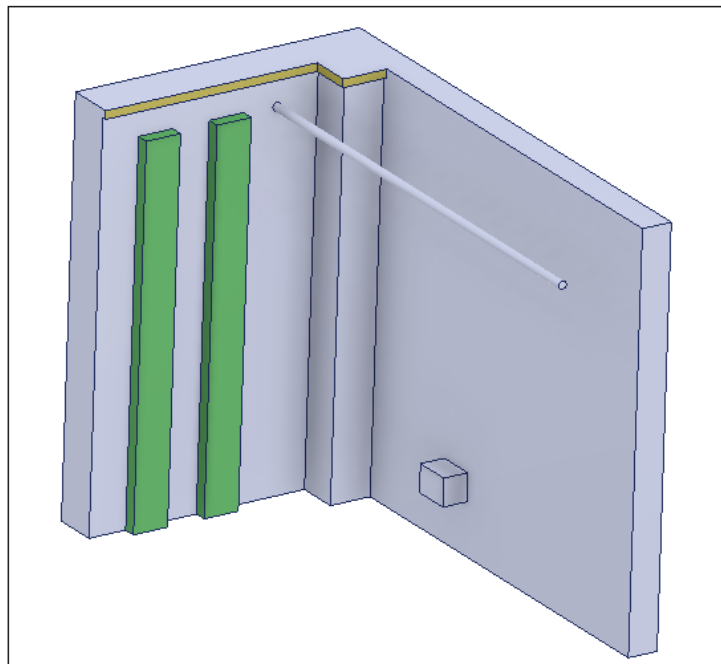


**Figura 3.12:** Cargas aplicadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O corte efetuado na estrutura obrigou a modelar novamente a plataforma com as respectivas alterações no piso e nos suportes de fixação. As modificações realizadas na plataforma foram nos suportes de fixação na parede e também na instalação do reforço de uma viga quadrada (suporte 3).

Essas modificações na geometria do piso da plataforma foram por causa da configuração distinta deste laboratório relativamente ao anterior. Na parede do novo local de instalação da plataforma há um pilar na sua lateral, Fig.(4.1). Sendo assim foi necessário realizar uma adaptação na geometria do piso da plataforma para poder encaixar o piso neste canto. Realizou-se então uma primeira simulação com todas as condições de contorno, malha e contactos descritos na secção 3.

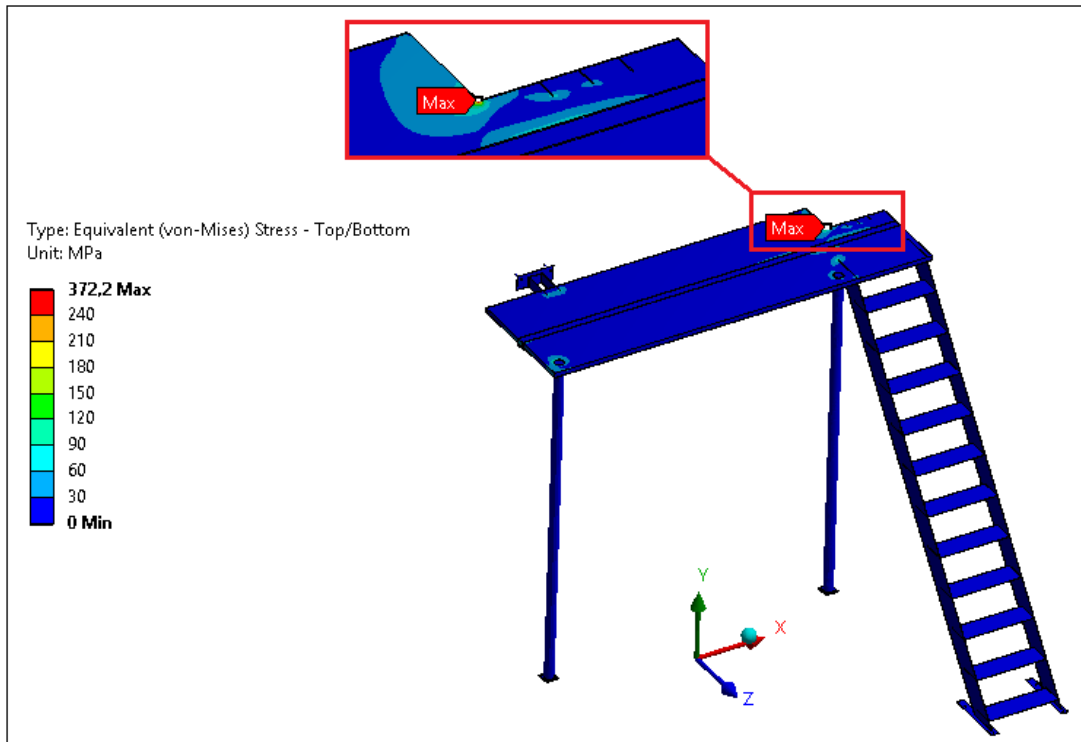


**Figura 4.1:** Modelo 3D do local de implantação da plataforma.

O aparato experimental está representado pelos paralelepípedos verticais verdes, havia também um tubo da rede de aquecimento que tinha que ser contornado e um

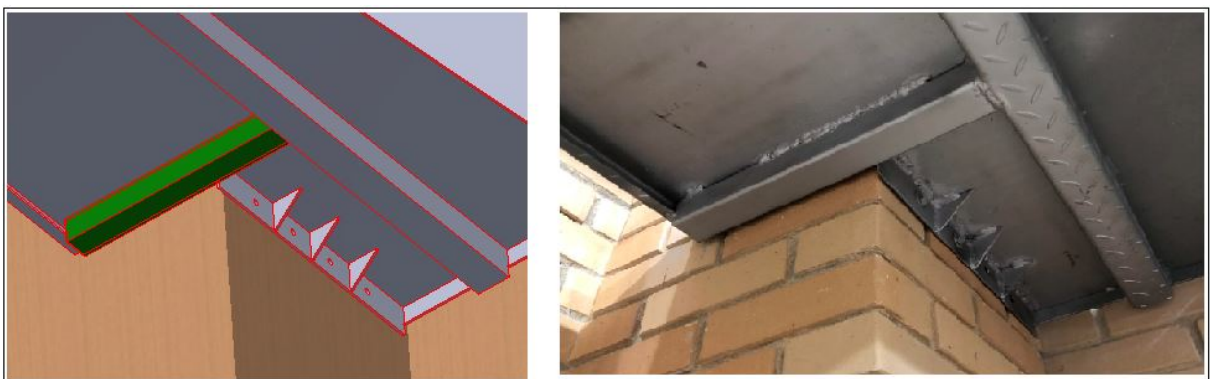
lavatório representado por um cubo na lateral da parede, Fig.(4.1).

Para a primeira simulação o resultado da tensão máxima no piso da plataforma foi de  $\sigma = 372,20$  MPa excedendo a tensão admissível, Fig.(4.2), devido a uma elevada concentração de tensões no piso nas proximidades do suporte 2.



**Figura 4.2:** Tensão de von-Mises antes da viga quadrada.

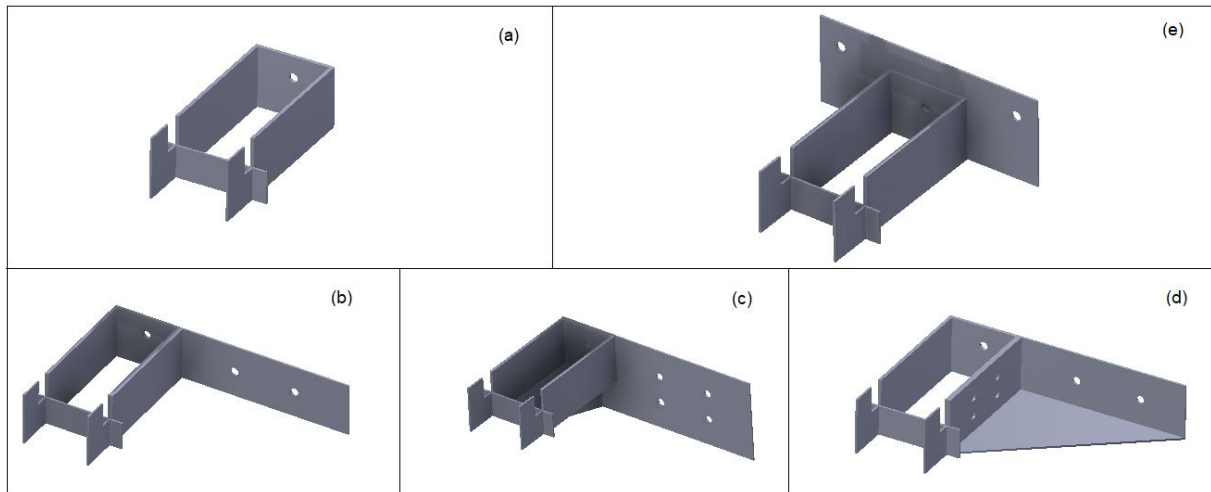
Como solução para este problema, fixou-se uma viga de secção transversal quadrada com 3 mm de espessura, Fig.(4.3), que inicialmente não estava previsto e verificou-se posteriormente que a tensão no piso da plataforma era inferior à tensão admissível, como mostrado na Fig.(4.11).



**Figura 4.3:** Viga quadrada modelo e na instalação.

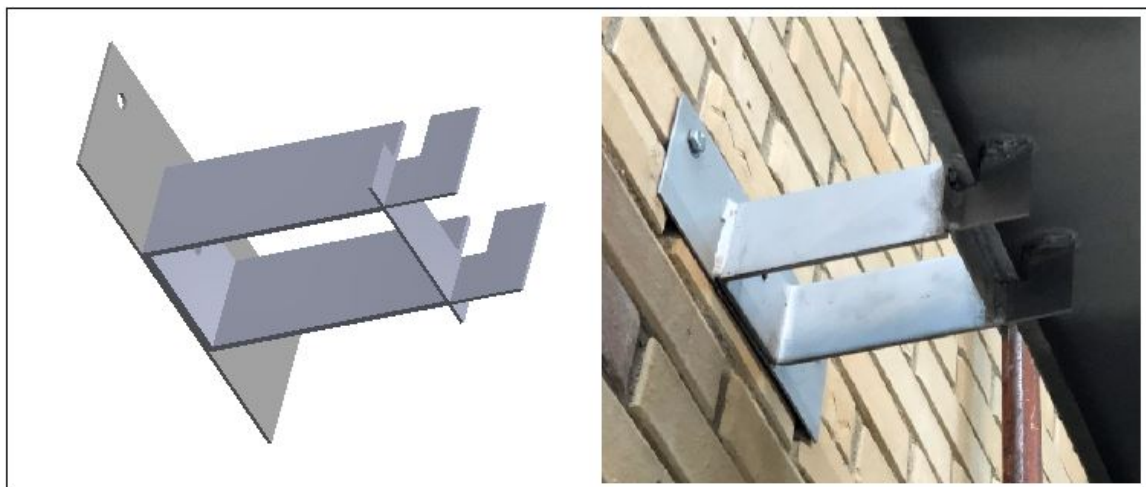
O suporte 1 da plataforma também foi alterado, tendo sido estudadas uma série

de soluções Fig.(4.4).



**Figura 4.4:** Soluções do suporte 1.

Segundo a norma do fabricante das buchas de fixação na parede (Intec 2003), "A bucha deve colocar-se a um mínimo de 300mm da margem vertical da parede e quatro vezes a espessura do tijolo, começando a contar a partir da margem superior duma parede desligada. Convém evitar a aplicação nas juntas de ligação". Sendo assim, foram desenvolvidos 4 modelos de suportes, (b) a (e), para afastar o apoio da plataforma da parede desligada, Fig.(4.4). O modelo escolhido foi a solução (e) porque permite a fixação de dois parafusos, e cada parafuso num tijolo diferente, não comprometendo a sua resistência além de cumprir os requisitos do fabricante. Na Fig.(4.5) observa-se a solução (e) do suporte 1 instalado na plataforma.



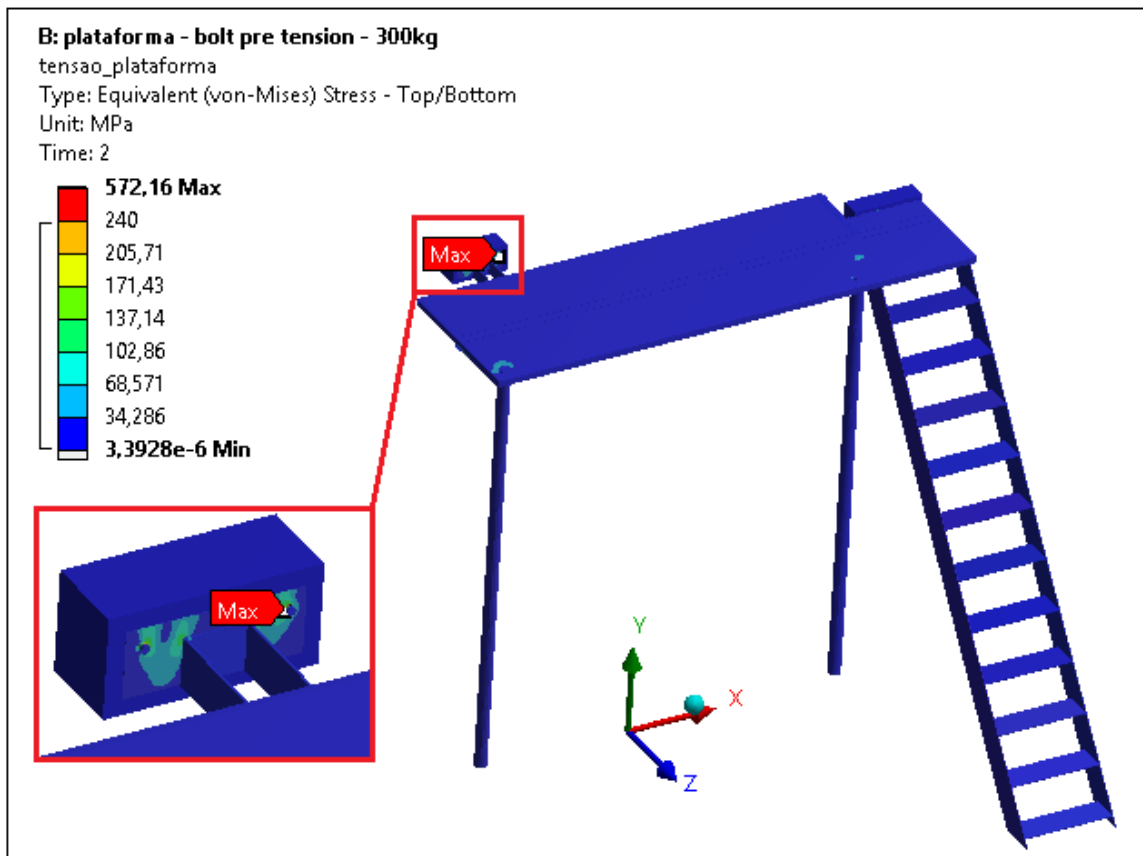
**Figura 4.5:** Solução (e) escolhida - Comparação suporte modelo VS real.

As restantes soluções não foram escolhidas porque os apoios apenas distanciavam a furação da extremidade da parede desligada e não os apoios em si. Esses apoios ori-

ginariam um esforço elevado na parede. Já na solução (e), o próprio suporte em U foi afastado da extremidade da parede desligada e permitiu a fixação de dois parafusos em dois tijolos diferentes também mais afastados dessa parede conforme recomendações dos fabricantes dos parafusos.

#### 4.1 TENSÕES DE VON-MISES

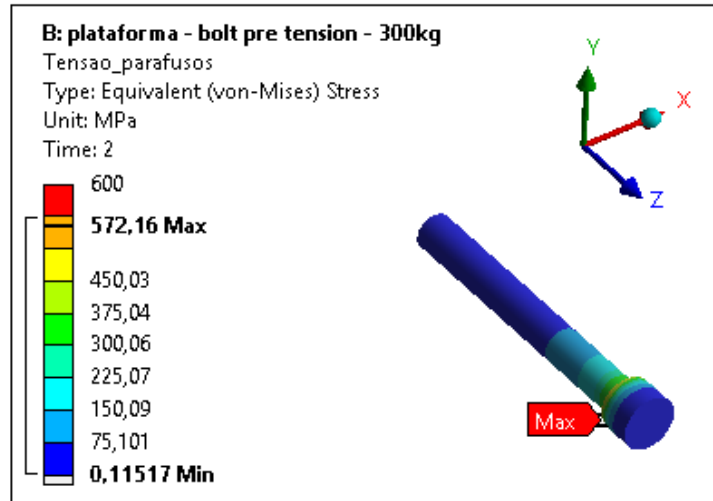
Os resultados da análise obtidos pela simulação no ANSYS® são mostrados na Fig.(4.6). Estas tensões são comparadas com as tensões admissíveis, como descrito na secção 2.5. A tensão máxima de von-Mises foi de  $\sigma = 572,16$  MPa localizada na superfície do parafuso, com a carga aplicada de 300 kg distribuída sobre o piso da plataforma.



**Figura 4.6:** Distribuição da tensão de von Mises.

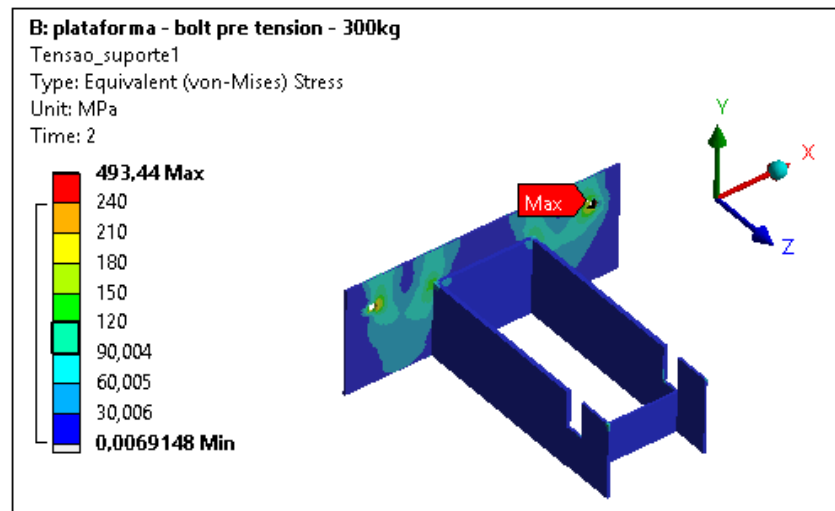
Observa-se na Fig.(4.7) que a tensão máxima encontrada está na superfície do parafuso e não prejudica a fixação da plataforma. Além disso a tensão de prova do parafuso é igual a 600 MPa na qual é superior à tensão atuante de 572,16 MPa.

As tensões nos suportes 1 e 2 também foram analisadas. No suporte 1, Fig.(4.8), a tensão máxima foi de 493,44 MPa superior a tensão admissível ( $\sigma_{adm} = 240$  MPa), com



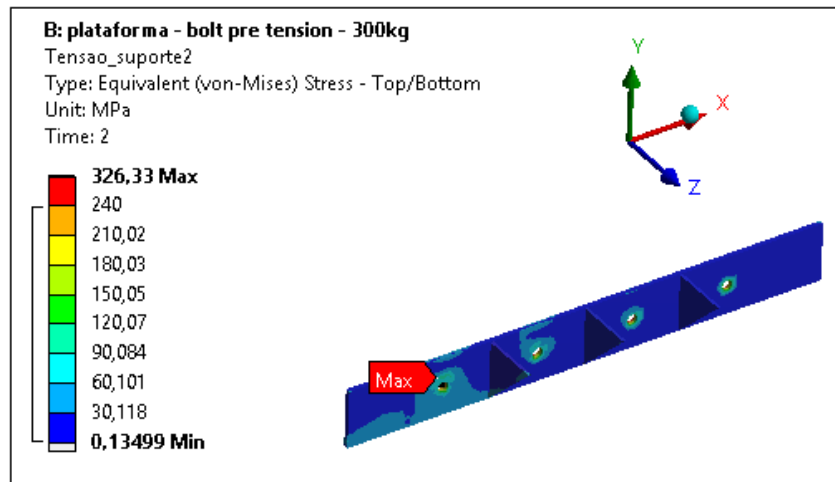
**Figura 4.7:** Distribuição da tensão de von Mises no parafuso.

um valor do coeficiente de segurança de  $n = 1,5$ . Porém esta tensão é um concentrador de tensão localizado nas proximidades do parafuso, não prejudicando a estrutura da plataforma.

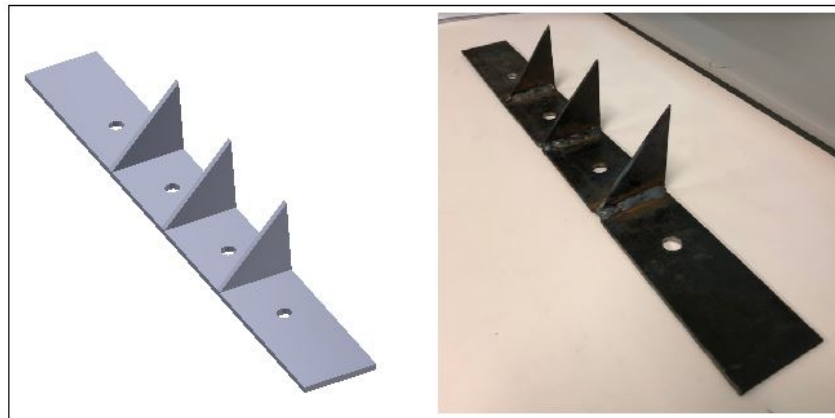


**Figura 4.8:** Distribuição da tensão de von Mises no suporte 1.

Já na Figura 4.9, a tensão máxima encontrada no suporte 2 é equivalente a  $\sigma = 326,33$  MPa. Assim como no suporte 1, esta tensão é causada pelos furos que são concentradores de tensão e não prejudicam a estrutura da plataforma.

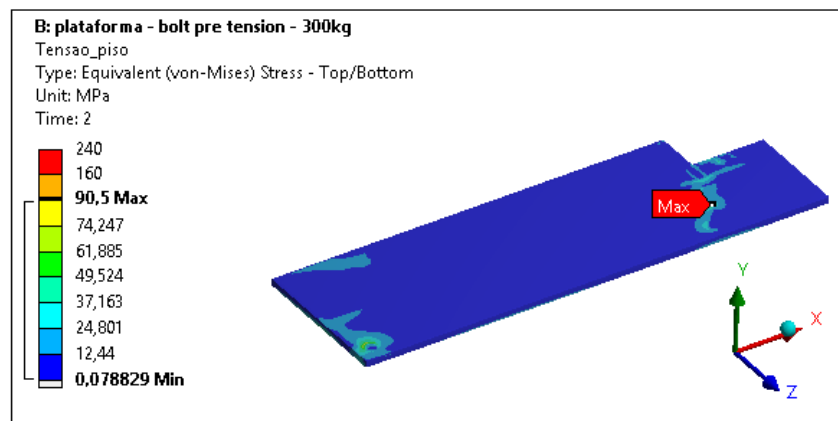


**Figura 4.9:** Distribuição da tensão de von Mises no suporte 2.



**Figura 4.10:** Suporte 2 modelo e sua montagem final.

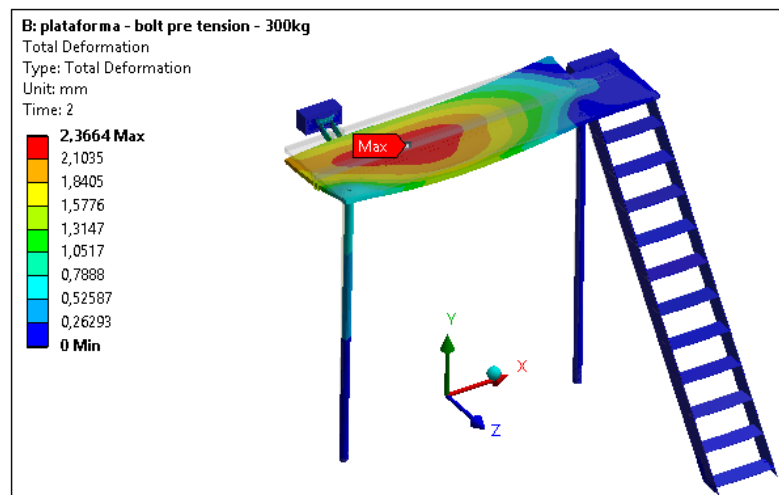
A tensão no piso da plataforma, com uma carga distribuída de 300 kg, fica mais de 2,5 vezes a baixo dos valores limites determinados através do fator de segurança de  $n = 1,5$ .



**Figura 4.11:** Distribuição da tensão de von Mises no piso da plataforma.

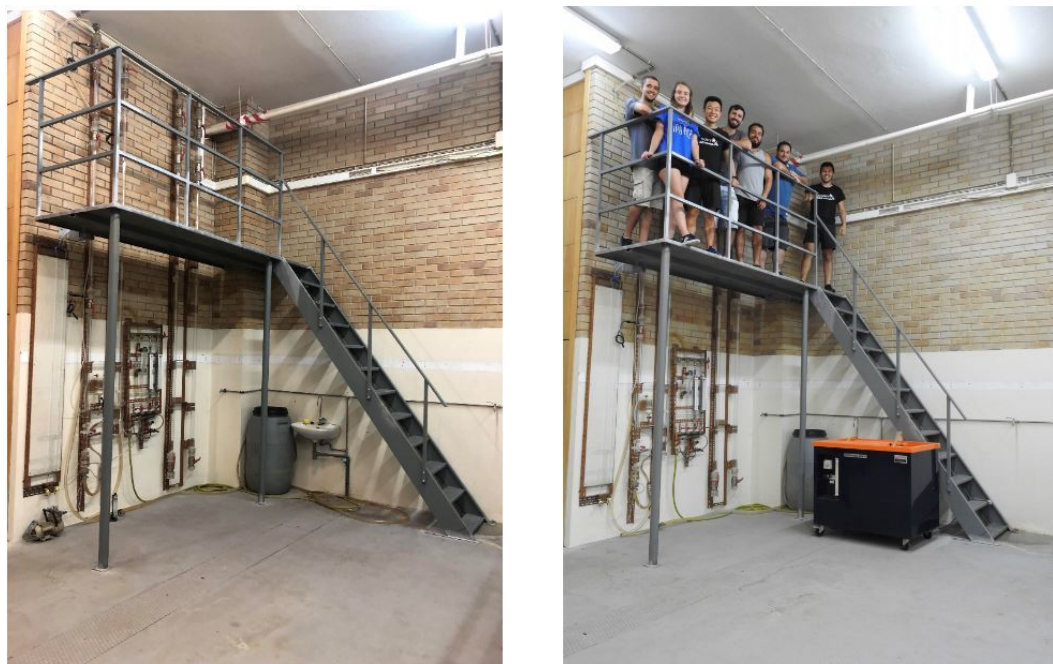
## 4.2 DESLOCAMENTO

Para uma carga distribuída de 300 kg no piso da plataforma, o deslocamento máximo foi de 2,37 mm. Para uma melhor visualização da deformação, aplicou-se uma escala de ampliação (59x), Fig.(4.12).



**Figura 4.12:** Deslocamento máximo (Ampliado 59x).

Observa-se na Fig.(4.13) a plataforma final montada e instalada no Laboratório de mecânica de fluidos e hidráulica.



**Figura 4.13:** Plataforma final instalada sem e com carga.

## 5 CONCLUSÕES

Realizou-se a recuperação de uma plataforma desmontada em 2010. Procedeu-se as adaptações devido a diferenças do pé direito do espaço bem como devido a existência de um pilar numa esquina do laboratório. As alterações foram: corte no piso, nas colunas, na escada e nos suportes de fixação com a parede.

A validação destas alterações foi realizada a partir de simulações numéricas utilizando o método de elementos finitos com auxílio do *software* ANSYS<sup>®</sup>. O projeto de execução da plataforma seguiu a norma (ISO-14122-2 2016) e a normas dos fabricantes dos parafusos (Intec 2003).

Os resultados das simulações numéricas são mostrados na secção 4. Para uma carga distribuída de 300 kg verificou-se as tensões máximas encontradas foram 37,70% inferiores às tensões dos materiais da estrutura descritos na secção 3.3, incluindo o coeficiente de segurança. O deslocamento máximo no piso da plataforma foi de 2,37 mm.

O modelo do suporte 1 escolhido foi a solução (e), Fig.(4.5). Por permitir a fixação da plataforma através de dois parafusos aplicados em tijolos diferentes e por cumprir as recomendações do fabricante de parafusos. O cálculo destes parafusos foi realizado analiticamente a partir dos (ou paralelamente às simulações) resultados das simulações, tendo sido determinado o binário de montagem, um parâmetro importante na instalação da plataforma.

Após o projeto de execução e da validação numérica, realizou-se a construção dos suportes e posteriormente a instalação da plataforma no novo local. A plataforma instalada permitiu a montagem segura do aparato experimental do escoamento bifásico. As manobras e manuseio das válvulas e leitura de valores experimentais, não teriam sido possíveis sem a garantia de segurança conferida pela plataforma, sendo um dos elementos fundamentais, mas não relevantes, nas atividades descritas na Parte I desta dissertação.

## REFERÊNCIAS

- Ansari et al. 1994 ANSARI, A. et al. A comprehensive mechanistic model for upward two-phase flow in wellbores. **SPE Production & Facilities**, Society of Petroleum Engineers (SPE), v. 9, n. 02, p. 143–151, maio 1994. Disponível em: <<https://doi.org/10.2118/20630-pa>>.
- Azevedo 2015 AZEVEDO, D. F. O. **Análise Estrutural com Ansys Workbench**. 1. ed. São Paulo: [s.n.], 2015.
- Bankoff 1960 BANKOFF, S. G. A variable density single-fluid model for two-phase flow with particular reference to steam-water flow. **Journal of Heat Transfer**, ASME International, v. 82, n. 4, p. 265, 1960. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.3679930>>.
- Barnea 1987 BARNEA, D. A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 13, n. 1, p. 1–12, jan. 1987. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0301-9322\(87\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90002-4)>.
- Barnea et al. 1985 BARNEA, D. et al. Gas-liquid flow in inclined tubes: Flow pattern transitions for upward flow. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 40, n. 1, p. 131–136, 1985. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(85\)85053-3](https://doi.org/10.1016/0009-2509(85)85053-3)>.
- Branco 1989 BRANCO, C. M. **Mecânica dos materiais - Teoria e Aplicações**. 1. ed. Portugal: McGraw-Hill, 1989.
- Chalgeri e Jeong 2019 CHALGERI, V. S.; JEONG, J. H. Flow patterns of vertically upward and downward air-water two-phase flow in a narrow rectangular channel. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier BV, v. 128, p. 934–953, jan. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.047>>.
- Chapra 2005 CHAPRA, R. P. C. S. C. **Numerical methods for Engineers**. 6. ed. [S.l.]: McGraw Hill - Higher Education, 2005.
- Cheng e Lin 2001 CHENG, T.-W.; LIN, T.-L. Characteristics of gas-liquid two-phase flow in small diameter inclined tubes. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 56, n. 21-22, p. 6393–6398, nov. 2001. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0009-2509\(01\)00251-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2509(01)00251-2)>.
- Dukler et al. 1964 DUKLER, A. E.; WICKS, M.; CLEVELAND, R. G. Frictional pressure drop in two-phase flow: B. an approach through similarity analysis. **AIChE Journal**, Wiley, v. 10, n. 1, p. 44–51, jan. 1964. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/aic.690100118>>.
- Fox R. W. e Prichard P 2010 FOX R. W., M. A. T.; PRICHARD P, J. **Introdução à Mecânica Dos Fluidos**. [S.l.]: LTC, 2010.

Garcia 2005 GARCIA, V. R. R. **Oxigenação em borbulhadores verticais e inclinados**. Tese (Doutorado) — University of Porto - Portugal., 2005.

Hanafizadeh et al. 2011 HANAFIZADEH, P.; GHANBARZADEH, S.; SAIDI, M. H. Visual technique for detection of gas–liquid two-phase flow regime in the airlift pump. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, Elsevier BV, v. 75, n. 3-4, p. 327–335, jan. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2010.11.028>>.

Harmathy 1960 HARMATHY, T. Z. Velocity of large drops and bubbles in media of infinite or restricted extent. **AIChE Journal**, Wiley, v. 6, n. 2, p. 281–288, jun. 1960. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/aic.690060222>>.

Hibbeler 2009 HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7. ed. Nanyang Technological University: Pearson, 2009.

Holman 2010 HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**. 1. ed. [S.l.]: Mc Graw Hill, 2010.

Intec 2003 INTEC. **Manuel técnico de fixções**. [S.l.], 2003.

Ishii 1975 ISHII, M. Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow. **Eyrolles - Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France**, 1975.

ISO-14122-2 2016 ISO-14122-2. **Safety of machinery - Pemanent means of access to macinery - Part 2: Working platforms and walkways**. [S.l.], 2016.

Jones e Zuber 1975 JONES, O. C.; ZUBER, N. The interrelation between void fraction fluctuations and flow patterns in two-phase flow. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 2, n. 3, p. 273–306, dez. 1975. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0301-9322\(75\)90015-4](https://doi.org/10.1016/0301-9322(75)90015-4)>.

Kassab et al. 2009 KASSAB, S. Z. et al. Air-lift pumps characteristics under two-phase flow conditions. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, Elsevier BV, v. 30, n. 1, p. 88–98, fev. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.09.002>>.

Lima 2011 LIMA, L. E. M. **Análise do modelo de mistura aplicado em escoamentos isotérmicos gás-líquido**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2011.

Mishima e Hibiki 1996 MISHIMA, K.; HIBIKI, T. Some characteristics of air-water two-phase flow in small diameter vertical tubes. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 22, n. 4, p. 703–712, ago. 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0301-9322\(96\)00010-9](https://doi.org/10.1016/0301-9322(96)00010-9)>.

Nicklin 1962 NICKLIN, D. Two-phase bubble flow. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 17, n. 9, p. 693–702, set. 1962. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(62\)85027-1](https://doi.org/10.1016/0009-2509(62)85027-1)>.

Pauchon et al. 1994 PAUCHON, C. et al. Tacite: A transient tool for multiphase pipeline and well simulation. **Society of Petroleum Engineers.**, 1994.

Ruggiero 1995 RUGGIERO, V. L. d. R. L. M. A. G. **Cálculo Numérico: aspectos teóricos e computacionais**. 2. ed. [S.l.]: Pearson, 1995.

Schlegel et al. 2009 SCHLEGEL, J. et al. Void fraction and flow regime in adiabatic upward two-phase flow in large diameter vertical pipes. **Nuclear Engineering and Design**, Elsevier BV, v. 239, n. 12, p. 2864–2874, dez. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.08.004>>.

Shen e Finch 1996 SHEN, G.; FINCH, J. Bubble swarm velocity in a column. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 51, n. 14, p. 3665–3674, jul. 1996. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00409-2](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00409-2)>.

Shoham 2005 SHOHAM, O. **Mechanistic Modeling of Gas-Liquid Two-Phase Flow in Pipes**. 1. ed. [S.l.]: Society of Petroleum Engineers, 2005.

Szalinski et al. 2010 SZALINSKI, L. et al. Comparative study of gas–oil and gas–water two-phase flow in a vertical pipe. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 65, n. 12, p. 3836–3848, jun. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ces.2010.03.024>>.

Taitel et al. 1980 TAITEL, Y.; BORNEA, D.; DUKLER, A. E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. **AIChE Journal**, Wiley, v. 26, n. 3, p. 345–354, maio 1980. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/aic.690260304>>.

Teixeira 1998 TEIXEIRA, J. A. S. **Oxigenação em aquicultura: o sistema do Tubo em U**. Tese (Doutorado) — University of Porto - Portugal., 1998.

Wallis 1969 WALLIS, G. B. One-dimensional two-phase flow. **McGraw-Hill Book Company**, 1969.

Whalley 1987 WHALLEY, P. Flooding, slugging and bottle emptying. **International Journal of Multiphase Flow**, Elsevier BV, v. 13, n. 5, p. 723–728, set. 1987. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0301-9322\(87\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90048-6)>.

White e Beardmore 1962 WHITE, E.; BEARDMORE, R. The velocity of rise of single cylindrical air bubbles through liquids contained in vertical tubes. **Chemical Engineering Science**, Elsevier BV, v. 17, n. 5, p. 351–361, 1962. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0009-2509\(62\)80036-0](https://doi.org/10.1016/0009-2509(62)80036-0)>.

Wu et al. 2017 WU, B. et al. A critical review of flow maps for gas-liquid flows in vertical pipes and annuli. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier BV, v. 326, p. 350–377, out. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.05.135>>.

Xue et al. 2016 XUE, Y. et al. Investigation on the void fraction of gas-liquid two-phase flows in vertically-downward pipes. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Elsevier BV, v. 77, p. 1–8, out. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.06.009>>.

YAMAGUCHI e YAMAZAKI 1982 YAMAGUCHI, K.; YAMAZAKI, Y. Characteristics of counter current gas-liquid two-phase flow in vertical tubes. **Journal of Nuclear Science and Technology**, Informa UK Limited, v. 19, n. 12, p. 985–996, dez. 1982. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/18811248.1982.9734247>>.

Zuber e Findlay 1965 ZUBER, N.; FINDLAY, J. A. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. **Journal of Heat Transfer**, ASME International, v. 87, n. 4, p. 453, 1965. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.3689137>>.