UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL

LUIZ FILIPE COSTA RIBEIRO

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL A ESCOAMENTOS DO TIPO GOLFADA EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

Niterói, RJ
2021

LUIZ FILIPE COSTA RIBEIRO

APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL A ESCOAMENTOS DO TIPO GOLFADA EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Orientador:
Prof. Ph.D. Roger Matsumoto Moreira

Niterói, RJ
2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

R484a Ribeiro, LUIZ FILIPE COSTA
APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL A ESCOAMENTOS DO TIPO GOLFADA EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS / LUIZ FILIPE COSTA Ribeiro ; Roger Matsumoto Moreira, orientador ; Antonio Lopes Gama, coorientador. Niterói, 2021.
78 f. : il.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

DOI: http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2021.mp.42151836851

1. Fluidodinâmica computacional. 2. Escoamento bifásico. 3. Tubulação industrial. 4. Vibração. 5. Produção intelectual. I. Moreira, Roger Matsumoto, orientador. II. Gama, Antonio Lopes, coorientador. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

LUIZ FILIPE COSTA RIBEIRO

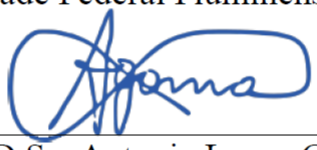
APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL A ESCOAMENTOS DO TIPO GOLFADA EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Aprovada em 20 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Ph.D. Roger Matsumoto Moreira - Orientador - Presidente
Universidade Federal Fluminense (UFF)



Prof. D.Sc. Antonio Lopes Gama
Universidade Federal Fluminense (UFF)

Prof. D.Sc. Julio Tomás Aquije Chacaltana
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

Niterói, RJ
2021

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus, por me ter dado sabedoria e resiliência ao longo desta caminhada.

Aos meus pais Sergio e Ivanilde, por todo suporte e motivação.

Ao Professor Orientador Roger Matsumoto Moreira pela paciência e ensinamentos ao longo da construção desta Dissertação, além de disponibilizar a infraestrutura do Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD).

Ao Petróleo Brasileiro S.A. pelo financiamento do projeto de pesquisa "Cálculo de Fadiga em Tubulações *Offshore*" (Processo PETROBRAS/UFF/FEC 5850.0108939.18.9) junto à UFF, concedendo bolsas de estudos, ao qual fui bolsista, e custeando a aquisição de computadores para o LabCFD e licenças do *software ANSYS Fluent*, sem os quais seria impossível atingir os resultados aqui apresentados.

À Escola de Engenharia da UFF, por desde a graduação vir me proporcionando conhecimento e abrindo portas.

"Não podemos resolver nossos problemas com o mesmo pensamento que tínhamos quando os criamos".
(Albert Einstein).

RESUMO

As unidades de produção *offshore* têm como principal objetivo receber a produção multifásica de poços, separá-la e entregar fases únicas e estabilizadas. Dessa forma, dependendo das condições operacionais, das propriedades dos fluidos escoando e da geometria da tubulação, formam-se diferentes regimes de escoamento. Dentre os regimes de escoamentos bifásicos possíveis, o mais crítico é o do tipo *slug* ou em golfada, pois são intermitentes e podem provocar vibrações excessivas na tubulação. Portanto, a presente Dissertação tem como objetivo desenvolver um estudo aplicando a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD), utilizando o software *Ansys Fluent* versão 2021 *Academic Research*, para simular e melhor entender a dinâmica envolvida em escoamentos bifásicos, tendo como foco o do tipo golfada. Sendo assim, foi elaborado um estudo utilizando a abordagem numérica via técnica de volumes finitos, tendo como base dados experimentais de testes de bancada apresentados por RAEDER (2012). Foram simulados, empregando em conjunto os modelos *Volume of Fluid* (VOF) e k-ε, seis diferentes cenários, onde foram observados os regimes de bolhas/bolhas alongadas e golfada. Como resultado, foram apresentados um estudo de sensibilidade de malha, além de uma validação, onde foram discutidos e analisados os gráficos de resíduos e de contornos de fração de volume de ar das simulações. Complementarmente, também foram apresentados e discutidos resultados numéricos referentes a variações de pressão em pontos da tubulação, sendo comparados com dados experimentais. Nesta comparação, foi verificado que os gráficos de flutuações de pressão obtidos nas simulações e os provenientes de teste de bancada seguem padrão de comportamento semelhantes, estando atrelados aos regimes de escoamento e dimensões dos bolsões de ar observados. Sendo assim, no regime de bolhas alongadas foram verificadas oscilações menos acentuadas na pressão, porém com uma frequência de oscilação maior. Enquanto que no regime de golfada, as flutuações foram mais acentuadas, porém com uma frequência de oscilação menor.

Palavras-chave: Tubulações Industriais, Vibrações, Escoamento Golfada, Fluidodinâmica Computacional (CFD).

ABSTRACT

The main objective of offshore production units is to receive multiphase production from wells, separate it and deliver single and stabilized phases. Thus, depending on the operating conditions, the properties of the flowing fluids and the geometry of the pipe, different flow regimes are formed. Among the possible two-phase flow regimes, the most critical is the slug type, because it is intermittent and can cause excessive vibrations in the pipe. Therefore, this dissertation aims to develop a study applying CFD technique, using the software Ansys *Fluent* version 2021 Academic Research, to simulate and better understand the dynamics involved in two-phase flows, focusing on the slug type. Thus, it was developed a study using the numerical approach via the finite volume technique, based on experimental data from bench tests presented by RAEDER (2012). Six different scenarios were simulated, using together the VOF and k-ε models, where it was observed the regimes of elongated bubbles/bubbles and slug. As a result, a mesh sensitivity study was presented, as well as a numerical validation, where the residuals and air volume fraction contour plots of the simulations were discussed and analyzed. In addition, numerical results referring to pressure variations at pipe points were also presented and availed, being compared with experimental data. In this comparison, it was verified that the graphs of pressure fluctuations obtained in simulations and those from the bench test follow similar behavior patterns, being linked to the flow regimes and dimensions of the observed air portions. Thus, in the elongated bubble regime, it was observed lower oscillations, but with a higher oscillation frequency. While in the slug regime, the fluctuations were more accentuated, but with a lower oscillation frequency.

Keywords: Industrial Piping, Vibration, Slug Flow, Computational Fluid Dynamics (CFD).

Sumário

1.INTRODUÇÃO 14
1.1. MOTIVAÇÃO 14
1.2. OBJETIVO 14
1.3. SUMÁRIO 16
2. CONCEITOS BÁSICOS 17
2.1. FALHAS POR FADIGA 17
2.1.1. Fadiga 17
2.1.2. Fatores que influenciam a vida em fadiga 18
2.2. VIBRAÇÃO EM TUBULAÇÕES 18
2.2.1. Vibração 18
2.2.2. Vibração por escoamentos bifásicos 19
2.2.3. Decorrência da vibração: Fadiga da tubulação 22
2.2.4. Diretrizes para uma Avaliação Proativa 22
2.3. ESCOAMENTOS BIFÁSICOS 23
2.3.1. Escoamentos bifásicos em tubulações horizontais 24
2.3.1.1. Mapa do regime bifásico para escoamentos horizontais 25
2.3.1.2. Processo de formação do escoamento slug na horizontal 27
2.3.2. Escoamentos bifásicos em tubulações verticais 28
2.3.2.1. Mapa do regime bifásico para escoamentos verticais 30
3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD): 31
3.1. INTRODUÇÃO 31
3.2. ABORDAGENS 33
3.3. EQUAÇÕES GOVERNANTES 33
3.3.1. Contabilização dos efeitos da compressibilidade pelo *ANSYS Fluent* 34
3.4. MODELO *VOLUME OF FLUID* (VOF) 35
3.5. MODELO DE TURBULÊNCIA: k-ε 36
3.7. DISCRETIZAÇÃO E LINEARIZAÇÃO 36
3.8. PRINCIPAIS ETAPAS 37
3.8.1. Pré-processamento 37
3.8.2. Processamento 37
3.8.3. Pós-processamento 38
3.8.4. Verificação e validação 38
3.8.5. Estudo de malha 39
4. METODOLOGIA DA PESQUISA 44

4.1. INTRODUÇÃO 44
4.2. INFRAESTRUTURA UTILIZADA 45
4.3. MODELO SIMULAÇÃO 45
4.3.1. Geometria 45
4.3.2. Cenários de injeção simulados 46
4.3.4. Configuração do modelo 48
4.3.3. Malhas 50
4.3.3.1. Malha tetraédrica 50
4.3.3.2. Malha Butterfly 52
5. RESULTADOS E VALIDAÇÃO 55
5.1. CONTORNOS DE FRAÇÃO DE VOLUME DE AR 55
5.1.1. Malha tetraédrica 55
5.1.2. Malha *Butterfly* 58
5.2. VERIFICAÇÕES, VALIDAÇÕES E DISCUSSÃO RESULTADOS 60
5.2.1. Resíduos 60
5.2.2. Número de iterações e capacidade de processamento. 63
5.2.3. Gráficos de Pressão Dinâmica x Tempo 64
6. CONCLUSÃO 72
7. BIBLIOGRAFIA 75

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1- BANCADA EXPERIMENTAL (A) E CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO (B).....15
FIGURA 2: DESCRIÇÃO DA VIBRAÇÃO USANDO UM SISTEMA SIMPLES DE MASSA-MOLA.....19
FIGURA 3 - CLASSIFICAÇÕES DE RISCO DE TUBULAÇÕES DEVIDO À VIBRAÇÕES 21
FIGURA 4 - TRECHO DE TUBULAÇÃO EXPERIMENTANDO ALTOS NÍVEIS DE VIBRAÇÃO EM DECORRÊNCIA DO REGIME DE GOLFADA. 21
FIGURA 5: UM EXEMPLO DE UMA RACHADURA POR FADIGA. 22
FIGURA 6: REGIMES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM TUBULAÇÕES HORIZONTAIS.....24
FIGURA 7: MAPA DO REGIME BIFÁSICO HORIZONTAL.....26
FIGURA 8: MAPA DO REGIME BIFÁSICO HORIZONTAL.....27
FIGURA 9: CONTORNOS DE FRAÇÃO DE VOLUME DE AR.....28
FIGURA 10: REGIMES DE ESCOAMENTO BIFÁSICO EM TUBULAÇÕES VERTICAIS. 29
FIGURA 11: MAPA DO REGIME BIFÁSICO VERTICAL 30
FIGURA 12: MAPA DO REGIME BIFÁSICO VERTICAL 31
FIGURA 13: COMPARAÇÃO ENTRE IMAGENS DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DE CFD.....39
FIGURA 14: GEOMETRIA DO DOMÍNIO COMPUTACIONAL 40
FIGURA 15 - GRIDS UTILIZADOS NO ESTUDO DE MALHA. 41
FIGURA 16: CONTORNOS DA DISTRIBUIÇÃO DE FASES SOB AS MESMAS CONDIÇÕES DE CONTORNO. 42
FIGURA 17 - DIMENSÕES GERAIS DOS TUBOS PARA OS ENSAIOS DE FORÇA DINÂMICA NA HORIZONTAL.....44
FIGURA 18- GEOMETRIA DA TUBULAÇÃO ANALISADA 46
FIGURA 19 - MAPA DE ESCOAMENTO COM PONTOS ALVO DA SIMULAÇÃO NO MAPA DO REGIME BIFÁSICO HORIZONTAL 47
FIGURA 20 - REGIÃO DA MALHA TETRAÉDRICA PRÓXIMAS AOS *INLETS*.....50
FIGURA 21 – MALHA TETRAÉDRICA NA SUPERFÍCIE DE INJEÇÃO DE ÁGUA 51
FIGURA 22 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA MALHA TETRAÉDRICA EM TRECHO AO LONGO DA TUBULAÇÃO.....51
FIGURA 23 - TRECHO DA MALHA TETRAÉDRICA EM REGIÃO NAS PROXIMIDADES DA PRIMEIRA CURVA DA TUBULAÇÃO 52
FIGURA 24 - SEÇÃO TRANSVERSAL DA MALHA *BUTTERFLY* EM TRECHO AO LONGO DA TUBULAÇÃO 53
FIGURA 25 - TRECHO DA MALHA *BUTTERFLY* EM REGIÃO NAS PROXIMIDADES DA PRIMEIRA CURVA DA TUBULAÇÃO 53
FIGURA 26 - TRECHOS ONDE FORAM ANALISADOS AS FRAÇÕES DE VOLUME 55
FIGURA 27 – CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: PRIMEIRO TRECHO HORIZONTAL CASO 1 (VAR=0,65 M/S E VH2O=2,5 M/S). MALHA TETRAÉDRICA. 53
FIGURA 28- CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: PRIMEIRO TRECHO HORIZONTAL CASO 2 (VAR=0,85 E VH2O=3 M/S). MALHA TETRAÉDRICA. 53
FIGURA 29 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: PRIMEIRO TRECHO HORIZONTAL CASO 3 (VAR=1,3 M/S E VH2O=4 M/S). MALHA TETRAÉDRICA. 53
FIGURA 30 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: PRIMEIRO TRECHO HORIZONTAL CASO 4 (VAR=1,5 M/S E VH2O=0,55 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 53
FIGURA 31 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: PRIMEIRO TRECHO HORIZONTAL CASO 5 (VAR=1 M/S E VH2O=1 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 54
FIGURA 32 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: PRIMEIRO TRECHO HORIZONTAL CASO 6 (VAR=1,5 M/S E VH20=1,5 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 54
FIGURA 33 – CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO PRIMEIRA CURVA CASO 1 (VAR=0,65 M/S E VH2O=2,5 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 54

FIGURA 34 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO PRIMEIRA CURVA CASO 2 (VAR=0,85 E VH2O=3 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA.....54
FIGURA 35 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO PRIMEIRA CURVA CASO 3 (VAR=1,3 M/S E VH2O=4 M/S). MALHA TETRAÉDRICA.....55
FIGURA 36 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO PRIMEIRA CURVA CASO 4 (VAR=1,5 M/S E VH2O=0,55 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 55
FIGURA 37 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO PRIMEIRA CURVA CASO 5 (VAR=1 M/S E VH2O=1 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 55
FIGURA 38 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO PRIMEIRA CURVA CASO 6 (VAR=1,5 M/S E VH20=1,5 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 55
FIGURA 39 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO SEGUNDA CURVA CASO 1 (VAR=0,65 M/S E VH2O=2,5 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 56
FIGURA 40 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO SEGUNDA CURVA CASO 2 (VAR=0,85 E VH2O=3 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA.....56
FIGURA 41 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO SEGUNDA CURVA CASO 3 (VAR=1,3 M/S E VH2O=4 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 56
FIGURA 42 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO SEGUNDA CURVA CASO 4 (VAR=1,5 M/S E VH2O=0,55 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 56
FIGURA 43 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO SEGUNDA CURVA CASO 5 (VAR=1 M/S E VH2O=1 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 57
FIGURA 44 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO SEGUNDA CURVA CASO 6 (VAR=1,5 M/S E VH20=1,5 M/S) . MALHA TETRAÉDRICA. 57
FIGURA 45- CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: PRIMEIRO TRECHO HORIZONTAL CASO 1 (VAR=0,75 M/S E VH2O=2,25 M/S). MALHA *BUTTERFLY*. 59
FIGURA 46 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: PRIMEIRO TRECHO HORIZONTAL CASO 5 (VAR=1 M/S E VH2O=1 M/S). MALHA *BUTTERFLY*. 59
FIGURA 47 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO PRIMEIRA CURVA CASO 1 (VAR=0,75 M/S E VH2O=2,25 M/S) . MALHA *BUTTERFLY*. 59
FIGURA 48 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO PRIMEIRA CURVA CASO 5 (VAR=1 M/S E VH2O=1 M/S) . MALHA *BUTTERFLY*. 59
FIGURA 49 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO SEGUNDA CURVA CASO 1 (VAR=0,75 M/S E VH2O=2,25 M/S) . MALHA *BUTTERFLY*. 59
FIGURA 50 - CONTORNOS DA FRAÇÃO DE VOLUME DE AR E ÁGUA: REGIÃO SEGUNDA CURVA CASO 5 (VAR= 1 M/S E VH2O= 1 M/S) . MALHA *BUTTERFLY*. 59
FIGURA 51 - GRÁFICOS DE RESÍDUOS CASO 1: MALHA TETRAÉDRICA X *BUTTERFLY* 61
FIGURA 52 - GRÁFICOS DE RESÍDUOS CASO 6: MALHA TETRAÉDRICA X *BUTTERFLY* 62
FIGURA 53 - PONTO DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO EM TRECHO HORIZONTAL DA TUBULAÇÃO 65
FIGURA 54 - PONTO DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO NA SEGUNDA CURVA DA TUBULAÇÃO 65
FIGURA 55 - CASO 1: MONITORAMENTO PRESSÃO DINÂMICA PONTO NA CURVA (Β=25%, REGIME DE BOLHAS ALONGADAS).....66
FIGURA 56 - CASO 5: MONITORAMENTO PRESSÃO DINÂMICA PONTO NA CURVA (Β=50%, REGIME DE GOLFADAS) 66
FIGURA 57 - CASO 1: MONITORAMENTO PRESSÃO DINÂMICA PONTO NA HORIZONTAL (Β=25%, REGIME DE BOLHAS ALONGADAS) 67
FIGURA 58 - CASO 5: MONITORAMENTO PRESSÃO DINÂMICA PONTO NA HORIZONTAL (Β=50%, REGIME DE GOLFADAS) 67

FIGURA 59 -CASO 1: MOMENTO EM QUE PRIMEIRO BOLSÃO DE AR ATINGE O PONTO DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO NA CURVA 68
FIGURA 60 - CASO 1: MOMENTO EM QUE PRIMEIRO BOLSÃO DE AR ATINGE O PONTO DE MONITORAMENTO DE PRESSÃO NA CURVA 69
FIGURA 61 - SINAL NO TEMPO DA FORÇA DINÂMICA EM ESCOAMENTO POR BOLHAS (B = 25%) 70
FIGURA 62 - SINAL NO TEMPO DA FORÇA DINÂMICA EM ESCOAMENTO POR GOLFADAS (B = 50%) 70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Pontos alvo da simulação no mapa do regime bifásico horizontal

TABELA 2 – Número de elementos e nós Malha tetraédrica e *Butterfly*

TABELA 3 – Tempo de processamento de casos com *time-step* empregado e máquina utilizada

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CFD	*Computational Fluid Dynamics* - Fluidodinâmica Computacional
FEA	*Finite Element Analysis* – Análise de Elementos Finitos
LOF	*Likelihood of Failure* – Probabilidade de Falha
SBC	*Small Bore Conections* - Derivações de Pequeno Diâmetro (SBC)
SBC	*Small Bore Connections* – Derivações de Pequeno Diâmetro
UEP	Unidade Estacionária de Produção
VOF	*Volume of Fluid* - Modelo Volume de Fluidos

1.INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Falhas por fadiga induzidas por vibração em tubulações são uma grande preocupação devido aos problemas relacionados à segurança, quando na liberação repentina de fluidos pressurizados (perigoso/inflamável), tempo de inatividade da produção, custos de ações corretivas e impactos ambientais. (ENERGY INSTITUTE, 2008)

Dados publicados pelo *Health & Safety Executive* do Reino Unido para a indústria *offshore* mostraram que, no setor britânico do Mar do Norte, a vibração e a fadiga das tubulações são responsáveis por mais de 20% de todas as liberações/vazamentos de hidrocarbonetos. (ENERGY INSTITUTE, 2008).

As unidades de produção *offshore* têm como principal objetivo receber a produção multifásica de poços, separá-la e entregar fases únicas e estabilizadas. Dessa forma, dependendo das condições operacionais, das propriedades dos fluidos escoando e da geometria da tubulação, formam-se diferentes regimes de escoamento.

Dentre os regimes de escoamentos bifásicos possíveis, o mais crítico é o do tipo *slug* ou em golfada, pois são intermitentes e podem provocar vibrações excessivas na tubulação (EMMERSON *et al*., 2015). Entende-se por escoamento do tipo *slug* quando se formam golfadas a partir de ondas instáveis originadas na interface gás-líquido de um escoamento estratificado.

A vibração induzida pelo escoamento em golfada afeta um número considerável de tubulações em unidades de produção *offshore*, podendo ocasionar falhas por fadiga, no caso de vibrações excessivas. Por esse motivo escoamentos em golfada é considerado como crítico (AL-KHALIFA *et al.*, 2016).

Dentre as diretrizes da *Energy Institute* (2008) para evitar falhas por fadiga induzida por vibração em tubulação de processo, existem as Técnicas Preditivas Especializadas, estando a Fluidodinâmica Computacional (CFD), foco desta Dissertação, entre elas.

1.2. OBJETIVO

Esta Dissertação tem como objetivo desenvolver um estudo aplicando a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD) para a avaliação de escoamentos bifásicos em tubulações, tendo como foco regime de golfada. Para isso, foi utilizado o software *Ansys Fluent* versão 2021 *Academic Research*, empregando método de volumes finitos.

A geometria e os cenários simulados foram inspirados em trabalho previamente publicado por RAEDER (2012), envolvendo com testes experimentais. Na figura 1(a), a seguir, é apresentada foto da bancada de teste utilizada.

A geometria para simulação, Figura 1(b), consiste em uma tubulação de 19,5 mm de diâmetro interno, em formato "U" na posição horizontal. Existindo duas superfícies de entrada na parte superior, uma na horizontal, onde é injetada água; e outra obliqua, onde é injetado ar. Enquanto que na parte inferior da tubulação fica a superfície de saída (*outlet*).

Primeiramente foram selecionados seis cenários de injeção para simulação em uma malha tetraédrica, menos elaborada e com menor custo computacional, a fim de averiguar quais regimes de escoamento são identificados. Fazendo uma análise qualitativa-visual dos resultados, avaliando principalmente o comportamento dos bolsões de ar ao longo da tubulação.

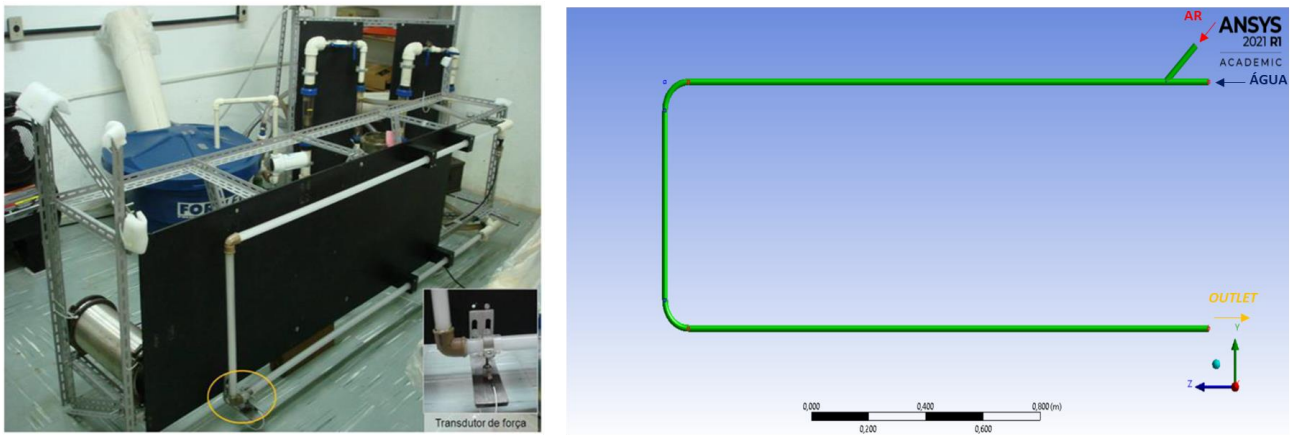


Figura 1- Bancada experimental (a) e geometria de simulação (b).

Fonte: RAEDER, 2012.

Posteriormente, para fins de análise de sensibilidade de malha e posterior validação dos resultados, foram selecionados dois casos para serem simulados utilizando a malha do tipo *butterfly*, mais refinada e adequada para o escoamento em golfada (HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR, 2010), porém demandando maior custo computacional.

Por fim, os resultados são apresentados, discutidos e validados. Neste sentido, foram analisados os gráficos de resíduos e de contornos de fração de volume de ar das simulações. Complementarmente, são expostos os resultados numéricos referentes a variações de pressão em diferentes pontos da tubulação, sendo comparados com dados experimentais.

1.3. SUMÁRIO

Esta dissertação está organizada em sete capítulos incluindo esta introdução.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos básicos de fadiga e vibrações induzidas pelo escoamento bifásico, fenômenos que tubulações industriais podem ser submetidas durante operação. Nesta seção também são apresentados os tipos de escoamentos bifásicos, juntamente dos mapas de regimes de escoamento.

Com relação ao Capítulo 3, é abordado mais detalhadamente a Fluidodinâmica Computacional (CFD), apresentando as equações governantes, modelos matemáticos utilizados e as etapas para construção e validação de um modelo de simulação.

No Capítulo 4 é exposta a metodologia de pesquisa, onde são apresentadas a infraestrutura computacional utilizada, a geometria empregada, os cenários de simulação selecionados, os modelos adotados e as malhas testadas.

Os resultados, análises e validações são apresentados no Capítulo 5. Nesta seção são expostos os contornos de fração de volumes obtidos, estudo de sensibilidade de malha, análises dos gráficos de resíduos, além de uma validação contra dados experimentais.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões desta dissertação e sugestões de futuros trabalhos para a continuação do estudo aqui apresentado.

A Bibliografia é apresentada no Capítulo 7.

2. CONCEITOS BÁSICOS

No capítulo são apresentados conceitos básicos de fadiga e vibrações induzidas pelo escoamento bifásico, fenômenos que tubulações industriais podem ser submetidas durante operação. Também são apresentados os tipos de escoamentos bifásicos, juntamente dos mapas de regimes de fluxo, tendo como foco o padrão de golfada.

2.1. FALHAS POR FADIGA

2.1.1. Fadiga

Uma fratura simples é a separação de um corpo em duas ou mais peças em decorrência da aplicação de uma tensão (constante ou mudando lentamente com o tempo), e a temperaturas que são baixas em relação à temperatura de fusão do material. A fratura também pode ocorrer por fluência (deformação dependente do tempo, normalmente em temperaturas elevadas) e fadiga (quando estruturas ficam expostas a tensões cíclicas dinâmicas e flutuantes). (CALLISTER, 2018).

A aplicação de uma carga abaixo do limite de resistência do material, não causa nenhum dano aparente na estrutura. Porém, se a mesma carga for aplicada repetidas vezes, isso pode dar início ao mecanismo de fadiga no material (SCHIJVE, 2009)

O processo de falha por fadiga é caracterizado por três etapas distintas: (1) início da trinca, na qual uma pequena trinca se forma em algum ponto de concentração de tensões; (2) propagação de trinca, durante a qual essa trinca avança incrementalmente a cada ciclo de tensão; e (3) falha final, que ocorre muito rapidamente quando a fissura em avanço atinge um tamanho crítico. (CALLISTER, 2018).

Rachaduras associadas à falha por fadiga quase sempre se iniciam na superfície de um componente em algum ponto de concentração de tensão. Os locais de nucleação de fissuras incluem juntas soldadas, arranhões de superfície, ranhuras, fios, amassados e semelhantes. Além disso, o carregamento cíclico pode produzir descontinuidades microscópicas de superfície, atuando como concentrador de tensão e, portanto, como locais de iniciação de trincas. (CALLISTER, 2018).

2.1.2. Fatores que influenciam a vida em fadiga

O comportamento de materiais em relação à fadiga na engenharia é altamente sensível a uma série de variáveis, incluindo nível médio de tensão, geometria da estrutura, efeitos de superfície e variáveis metalúrgicas, bem como fatores ambientais. (CALLISTER, 2018).

Quando um material é exposto a temperaturas elevadas por tensões térmicas flutuantes, identifica-se a fadiga térmica. Tensões mecânicas de uma fonte externa não precisam estar presentes neste caso. A origem dessas tensões térmicas é a restrição à expansão e / ou contração dimensional que normalmente ocorreria em um membro estrutural com variações de temperatura.

A falha que ocorre pela ação simultânea de uma tensão cíclica e ataque químico é denominada fadiga por corrosão. Ambientes corrosivos têm uma influência deletéria. Mesmo a atmosfera ambiente normal afeta o comportamento de fadiga de alguns materiais. Pequenos *pits* podem se formar como resultado de reações químicas entre o meio ambiente e o material, servindo como pontos concentração de tensão e, portanto, como locais de nucleação de trincas. Além disso, a taxa de propagação de trincas é aumentada como resultado do ambiente corrosivo. (CALLISTER, 2018).

2.2. VIBRAÇÃO EM TUBULAÇÕES

2.2.1. Vibração

A vibração é um movimento oscilatório em torno de uma posição de equilíbrio. Considere uma massa simples pendurada em uma mola, conforme Figura 2. Quando a massa é puxada para baixo e depois liberada, a mola se estende, se contrai e continua a oscilar por um período de tempo. A frequência de oscilação resultante é conhecida como frequência natural do sistema, sendo controlada pela massa e rigidez do sistema. (ENERGY INSTITUTE, 2008)

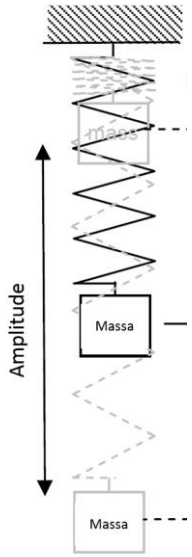


Figura 2: Descrição da vibração usando um sistema simples de massa-mola.
Fonte: ENERGY INSTITUTE, 2008.

Qualquer sistema estrutural, como uma tubulação, exibirá uma série de frequências naturais que dependem da distribuição de massa e rigidez em todo o sistema. A distribuição de massa e rigidez são influenciadas pelo diâmetro do tubo, propriedades do material, espessura da parede, localização de massas concentradas (como válvulas), suportes do tubo e também densidade dos fluidos. Deve-se notar que os suportes de tubos projetados para condições estáticas podem agir de maneira diferente em condições dinâmicas. A resposta da tubulação a uma excitação aplicada depende da relação entre a frequência de excitação e as frequências naturais do sistema, e do local de excitação. (ENERGY INSTITUTE, 2008).

2.2.2. Vibração por escoamentos bifásicos

As unidades de produção *offshore* têm como principal objetivo receber a produção multifásica de poços, separá-la e entregar fases únicas e estabilizadas. Dessa forma, dependendo das condições operacionais, das propriedades dos fluidos escoando e da geometria da tubulação, formam-se diferentes regimes de escoamento.

Do ponto de vista de integridade das estruturas, o regime de golfada é considerado como o mais prejudicial para a operação de uma unidade de produção. Esse padrão de escoamento tem potencial para causar sérios problemas de vibração, em decorrência de suas consideráveis variações de pressão e os significativos esforços produzidos em curvas, equipamentos e reduções.

Uma situação operacional que favorece o surgimento do escoamento em golfada (e, consequentemente altas amplitudes de vibração) é quando são observadas grandes variações de vazão de óleo e gás. Tal condição é verificada, por exemplo, no chamado *ramp-up* de produção, quando, após uma parada de manutenção, é restabelecida a produção através da reabertura dos poços interligados à uma Unidade Estacionária de Produção (UEP). Nesta fase, ocorrem elevados transientes de vazão, provocando golfadas que induzem níveis elevados de vibração na tubulação.

O regime de golfada provoca intervalos de produção a seco ou de gás para dentro do separador, seguido por períodos de altas vazões das fases líquida e gasosa, quando o pistonamento do líquido está sendo efetuado. Tal situação é prejudicial em decorrência das grandes flutuações de pressão e vazão provocadas.

Flutuações na vazão de produção da fase gasosa podem incorrer em problemas operacionais no processo de queima do gás. Além disso, flutuações entre altas pressões podem reduzir a capacidade de produção do campo. (GAMA e MOREIRA, 2007)

Em MOREIRA e GAMA (2007) são apresentadas medições de vibração em tubulações de unidades de produção *ofsshore* operando na Bacia de Campos. Com base na frequência e amplitude das vibrações aferidas, foi feita uma classificação de risco. Sendo assim, foram identificados trechos com uma classificação de risco em perigo ou necessitando de correção em decorrência de vibração induzida por escoamento bifásico. Entretanto, também foram observados trechos com risco marginal e/ou próximos das condições de projeto, conforme Figura 3.

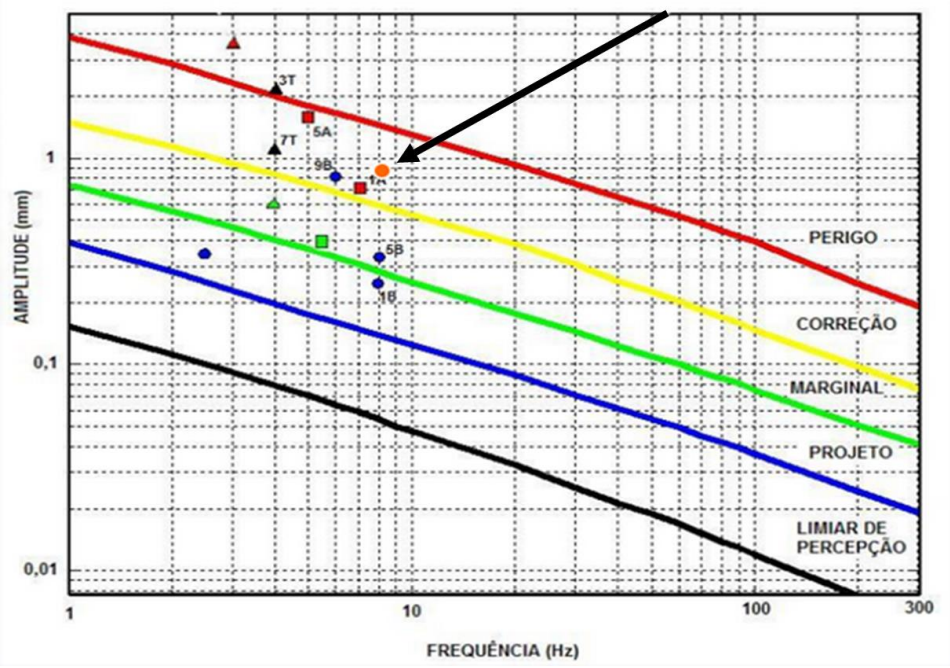


Figura 3 - Classificações de risco de tubulações devido à vibrações

Fonte: GAMA e MOREIRA, 2007.

Um exemplo de tubulação experimentando altos níveis de vibração em decorrência do regime de golfada foi um trecho entre a saída de um permutador e a entrada do separador de gás. Tal trecho está indicado pela seta preta na Figura 3 do diagrama de classificação de riscos pela. Na Figura 4, é apresentada uma fotografia do referido trecho, onde podemos verificar a existência de uma geometria com muitas mudanças de direção (que favorece a indução de vibrações).

Figura 4 - Trecho de tubulação experimentando altos níveis de vibração em decorrência do regime de golfada.

Fonte: GAMA e MOREIRA, 2007.

2.2.3. Decorrência da vibração: Fadiga da tubulação

A vibração da tubulação causa tensões dinâmicas que, se acima de um nível crítico, podem resultar na iniciação e/ou propagação de uma trinca por fadiga. A trinca por fadiga, se não identificada, pode levar a uma fratura de espessura e subsequente ruptura, como pode ser verificado na Figura 5. A vida de fadiga do componente pode ser relativamente curta (em alguns casos, minutos ou dias). No entanto, se a vibração for intermitente, a vida de fadiga do componente pode ser muito mais longa, dependendo da amplitude da tensão dinâmica e da frequência da vibração (ENERGY INSTITUTE, 2008).

Figura 5: Um exemplo de uma trinca por fadiga.
Fonte: ENERGY INSTITUTE, 2008.

2.2.4. Diretrizes para uma Avaliação Proativa

Uma avaliação proativa permite que projetistas se antecipem à eventos indesejados, sendo capazes de criarem barreiras e controles para prevenção de acidentes. Portanto, esse tipo de avaliação permite identificar as condições perigosas e analisar os riscos, levando em consideração os tipos de controles já existentes e a necessidade de instalação de controles adicionais com o objetivo de mitigar tais riscos.

A Energy Institute de Londres através do "*Guidelines for the avoidance of vibration induced fatigue failure in process pipework*" estabelece diretrizes para uma avaliação proativa. Sendo essa comumente realizada quando um novo sistema de processo está sendo projetado; ao realizar uma avaliação de uma planta existente ou sistema de processo; ou quando mudanças em uma planta existente ou sistema de processos estão sendo consideradas (como mudanças operacionais, de processo ou de equipamento).

Primeiramente, deve ser feita uma avaliação de risco, examinando probabilidade de falha (*likelihood of failure - LOF*), tendo um foco inicial naqueles sistemas considerados essenciais para o negócio e segurança, para então se determinar o risco geral, através de uma matriz de criticidade.

Principais Etapas de uma Avaliação Proativa

A execução de uma Avaliação Qualitativa é realizada para se identificar potenciais mecanismos de excitação e, também, fornecer um meio de ordenar uma série de sistemas ou unidades de processo a fim de priorizar a avaliação quantitativa subsequente. (ENERGY INSTITUTE, 2008).

Também devem ser feitas Avaliações Quantitativas LOF da linha principal, derivações de pequenos diâmetros (SBC) e dos poços de temperatura. Nessas etapas, o resultado típico é uma lista da pontuação LOF para cada mecanismo de excitação considerado.

É necessário também ser realizada uma inspeção visual independentemente dos resultados da avaliação qualitativa e quantitativa, a fim de capturar as questões *as-built* e para garantir que eventuais ações corretivas foram implementadas de forma satisfatória. Para instalações operacionais existentes, a inspeção visual também ajuda a identificar condições operacionais específicas de interesse (ENERGY INSTITUTE, 2008).

Técnicas básicas de medição de vibração de tubulação são utilizadas com o objetivo de fornecer uma avaliação de primeiro nível da gravidade da vibração da tubulação para as linhas principais e nos SBCs, obtendo uma indicação inicial da existência de uma ameaça à integridade da tubulação.

Também existem as Técnicas Preditivas Especializadas como Análise Estrutural (FEA) e de Fluidodinâmica Computacional (CFD), que fornecem um nível adicional de quantificação dos níveis de excitação. Tais técnicas podem ser utilizadas para avaliar potenciais modificações na planta.

Sendo assim, para o desenvolvimento do objetivo desta Dissertação, foi selecionada Técnica Preditiva Especializada da Fluidodinâmica Computacional (CFD), para se obter uma avaliação de escoamentos bifásicos em tubulações, tendo como foco regime de golfada.

2.3. ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

O escoamento bifásico ocorre quando duas fases percorrem uma mesma tubulação, sendo constituído de uma fase contínua e outra dispersa. A fase contínua pode se tratar de um meio líquido ou gasoso, enquanto que a fase dispersa pode ser constituída por partículas sólidas, bolhas de gás ou gotas de líquido (SOO, 1995).

2.3.1. Escoamentos bifásicos em tubulações horizontais

Escoamentos bifásicos em tubulações horizontais são identificados em várias situações ao longo de uma planta de processo. Neste sentido, dependendo das condições de processo e propriedades dos fluidos são formados diferentes padrões de escoamento, como mostrado na Figura 6.

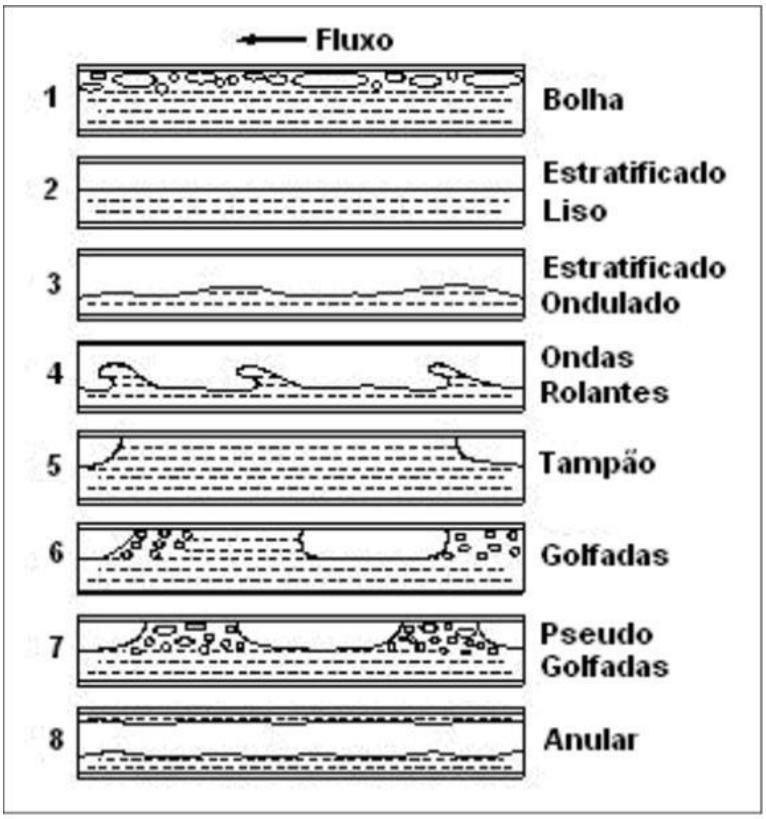


Figura 6: Regimes de escoamento bifásico em tubulações horizontais.
Fonte: VILLELA, 2004.

- Bolhas – Ocorre quando as velocidades dos fluidos escoantes são muito baixas, existindo poucas interações entre gás/líquido, acarretando na formação de bolhas que se acumulam na parte superior das tubulações.

- Estratificado – Ocorre em velocidades de líquido e gás baixas. Devido ao efeito da gravidade, as fases são separadas, de forma que o líquido escoa na parte inferior da tubulação, enquanto o gás ocupa a parte superior.
- Ondas Rolantes – Quando a velocidade do líquido é intermediária, ondas passam a ser formadas na interface das fases e da separação entre o líquido e o gás.
- Tampão – Quando já se encontra uma estrutura de ondas rolantes e existe um aumento da velocidade do líquido, distribuindo de uma maneira menos uniforme, fazendo com que a fase líquida passe a ocupar alguns espaços a mais na tubulação.
- Golfadas – Este tipo de escoamento é identificado quando são identificadas sequências de líquidos e camadas de gases em que a velocidade do líquido está aumentando significativamente. Pistões de líquido passam a ocupar partes significativas da tubulação, sendo separados por bolhas da fase gasosa que ocupam a parte superior da tubulação.
- Pseudo-Golfadas – Ocorre sob altas vazões de gás, de forma que pequenas bolhas passam a arear a fase líquida, se concentrando em regiões superiores da tubulação e no interior da fase líquida.
- Anular – Ocorre quando a velocidade do gás é muito alta e desloca o líquido para a parede da tubulação, fazendo com que a fase gasosa ocupe o corpo central da tubulação (ECONOMIDES, 2000).

Dentre os regimes de escoamentos bifásicos possíveis, o mais crítico é o do tipo golfada, pois são intermitentes e podem provocar vibrações excessivas na tubulação (EMMERSON et al., 2015).

2.3.1.1. Mapa do regime bifásico para escoamentos horizontais

Conforme exposto anteriormente, quando na ocorrência de um escoamento bifásico horizontal, diferentes padrões de escoamento podem ser formados. Sendo assim, com o intuito de se prever o regime que irá ser observado em determinada condição, foram elaborados os chamados mapas de regime bifásico (HERNANDEZ-PEREZ, 2008). Muitos métodos têm sido apresentados na literatura para esse fim, geralmente na forma de mapas bidimensionais nos quais as localizações dos limites entre as regiões do padrão de fluxo são baseadas em observações empíricas. Muitos desses mapas resultam de dados que cobrem uma gama bastante limitada de propriedades de fluidos e diâmetros de tubos. Consequentemente, grandes

discrepâncias são frequentemente observadas entre um regime de escoamento previsto e aquele realmente observado em um teste subsequente (MANDHANE et al., 1974). Neste sentido, são apresentados a seguir os mapas de regime de escoamentos propostos por CORNELIUSSEN et al. (2005) e MANDHANE et al. (1974) expostos nas Figuras 7 e 8, respectivamente.

Os eixos dos mapas de regime de escoamentos são baseados nas velocidades superficiais do líquido e gás. A velocidade superficial é uma velocidade hipotética da fase calculada como se a fase em questão fosse a única escoando em uma determinada área de seção transversal. A velocidade da fase especificada é calculada como se a segunda fase fosse ignorada.

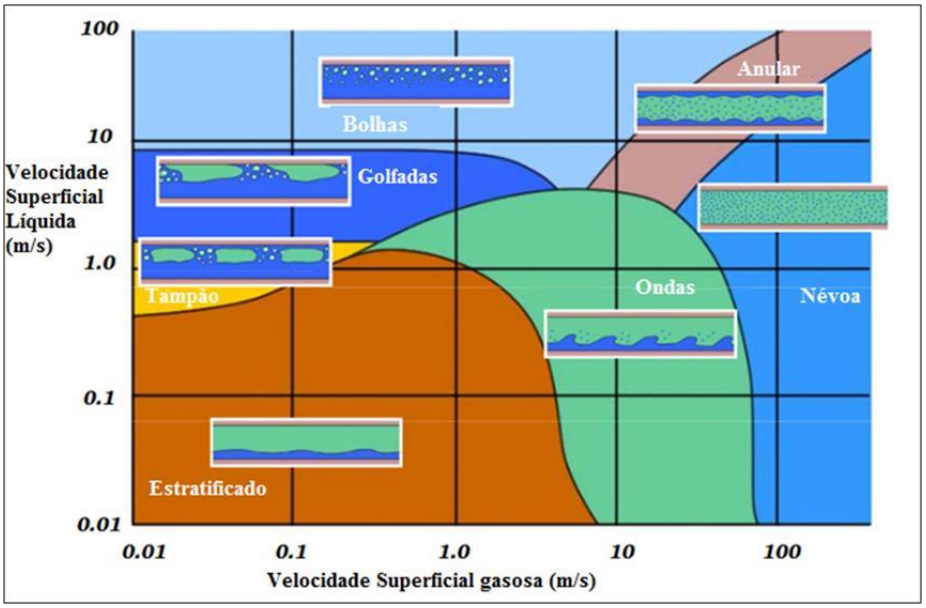


Figura 7: Mapa do Regime bifásico Horizontal.

Fonte: Adaptado de CORNELIUSSEN *et al*., 2005.

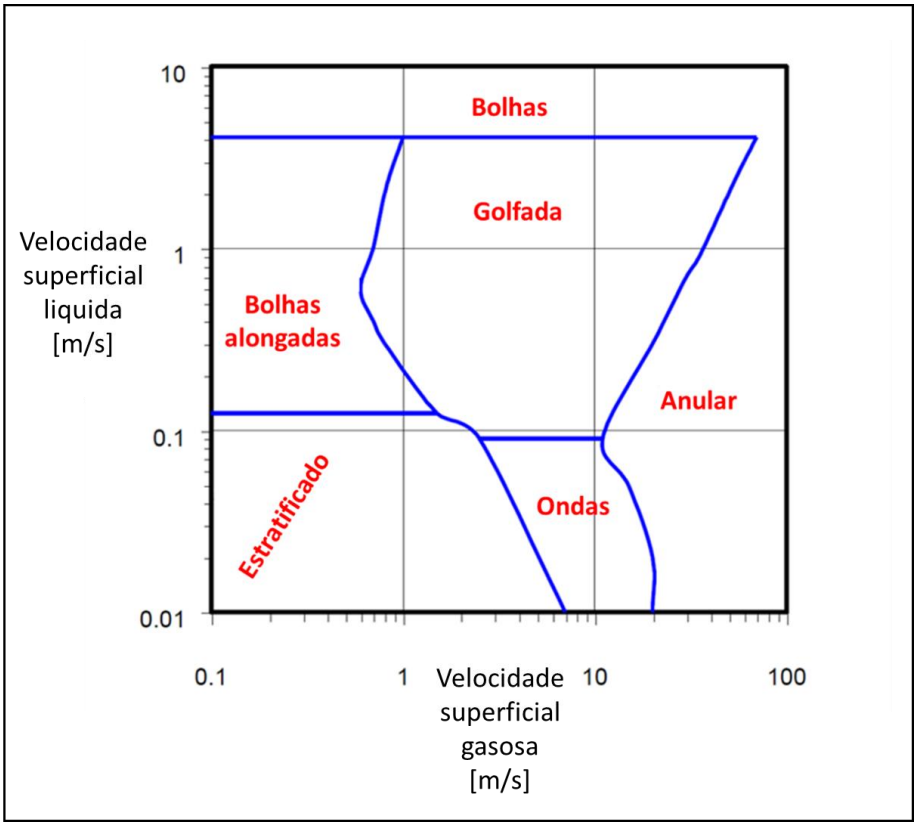


Figura 8: Mapa do Regime bifásico Horizontal.

Fonte: Adaptado de MANDHANE *et al.*, 1974.

Vale ressaltar que as transições nestes casos também são funções do diâmetro da tubulação, densidade dos fluidos e velocidade superficiais. O mapa do regime bifásico é uma ilustração qualitativa de como se comporta o fluxo de fluido e como cada regime é atingido dependendo das condições que o fluxo está submetido.

2.3.1.2. Processo de formação do escoamento *slug* na horizontal

Entende-se que o *slug* se origina de ondas instáveis formadas na interface gás-líquido de um fluxo estratificado, que eventualmente cresce em amplitude para bloquear a passagem de gás.

Neste sentido, a fim de se verificar esse processo de formação do *slug* em um escoamento de água e ar, é exposto na Figura 9 os contornos da fração de volume de ar de uma simulação executada por Hernandez-Perez (2008) em sua tese de Doutorado. Nesta figura o ar representado pelo vermelho e a água, azul.

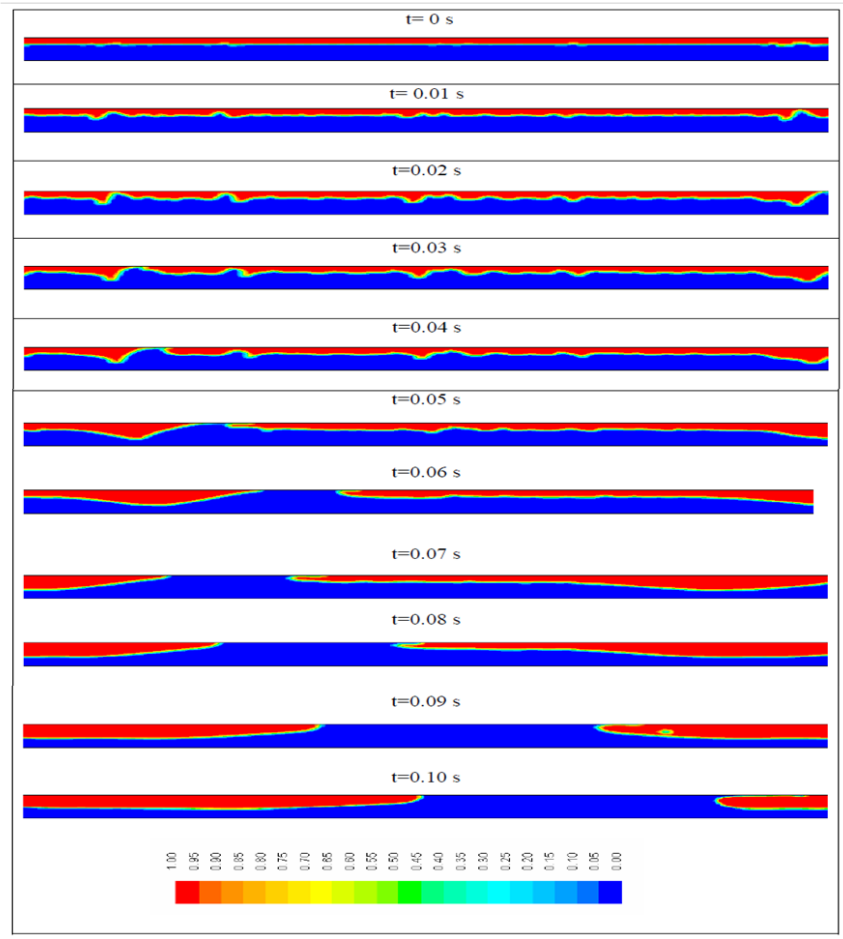


Figura 9: Contornos de fração de volume de ar
Fonte: HERNANDEZ-PEREZ, 2008.

Hernandez-Perez (2008) frisa que inicialmente se identifica um escoamento estratificado, porém com o aparecimento de distúrbios na interface gás-líquido ao longo do tubo, formam-se ondas que começam a crescer até formarem o *slug*, sendo um processo bem rápido.

2.3.2. Escoamentos bifásicos em tubulações verticais

A seguir na figura 10 são apresentadas as representações dos principais tipos de padrão de escoamento vertical:

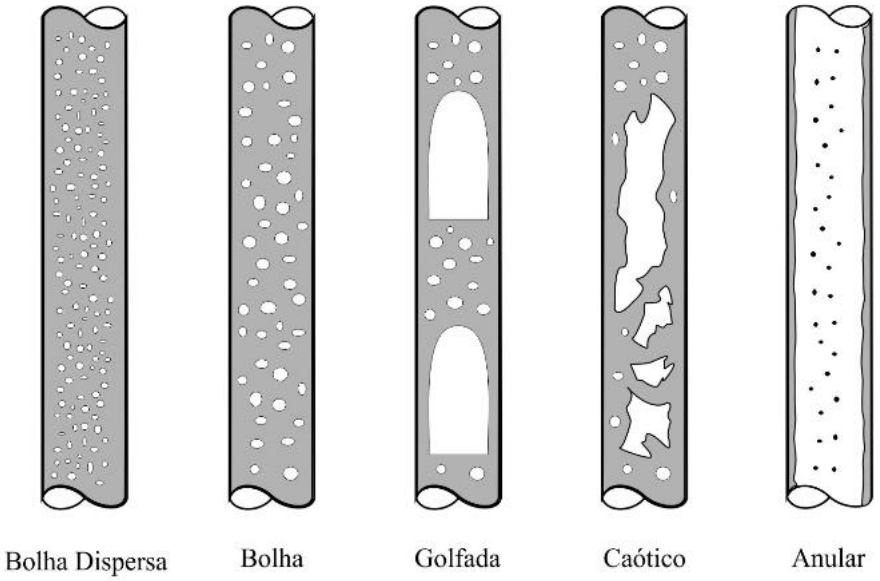


Figura 10: Regimes de escoamento bifásico em tubulações verticais.
Fonte: Adaptado de STUCKENBRUCK, 2020.

- **Bolha Dispersa:** Ocorre quando a velocidade do líquido é relativamente alta, sendo a fase gasosa tida como dispersa e fase líquida, contínua. Adicionalmente, o líquido e as bolhas de gás escoam na mesma velocidade.
- **Bolha:** Ocorre quando são identificadas velocidades relativamente baixas do líquido, com baixa turbulência, caracterizando-se pelo deslizamento entre as fases gasosa e líquida, sob elevadas frações volumétricas de líquido.
- **Golfada:** O escoamento vertical ascendente em golfada é simétrico com relação ao eixo do duto. A maior parte do gás concentra-se em bolsas de gás de tamanho expressivo com diâmetro quase igual ao diâmetro do duto.
- **Caótico:** Similar ao escoamento em golfada, diferindo por ser muito mais caótico, sem uma definição clara da interface gás-líquido. Ocorre sob velocidades do gás mais elevadas, quando as golfadas líquidas se quebram, tornando-se pequenas e nevadas (STUCKENBRUCK, 2020).
- **Anular:** Caraterizada por um núcleo gasoso deslocando a velocidade elevada, juntamente de um filme líquido escoando junto à parede do duto. Apresentando uma interface gás-líquido ondulada.

2.3.2.1. Mapa do regime bifásico para escoamentos verticais

No escoamento vertical à medida que a velocidade superficial do gás aumenta é possível observar as mudanças de regime de escoamento. A influência da velocidade superficial gasosa é tão evidente que é possível notar que no regime anular, até mesmo para velocidades superficiais liquidas altas, o escoamento se torna completamente dominado pela influência da passagem de gás.

Na mesma linha dos mapas bidimensionais para escoamentos horizontais apresentados anteriormente, também foram publicados diagramas para escoamentos verticais. Sendo assim são apresentados a seguir os mapas de regime de fluxo horizontal propostos por CORNELIUSSEN *et al.* (2005) e TAITEL *et al*. (1980) Nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

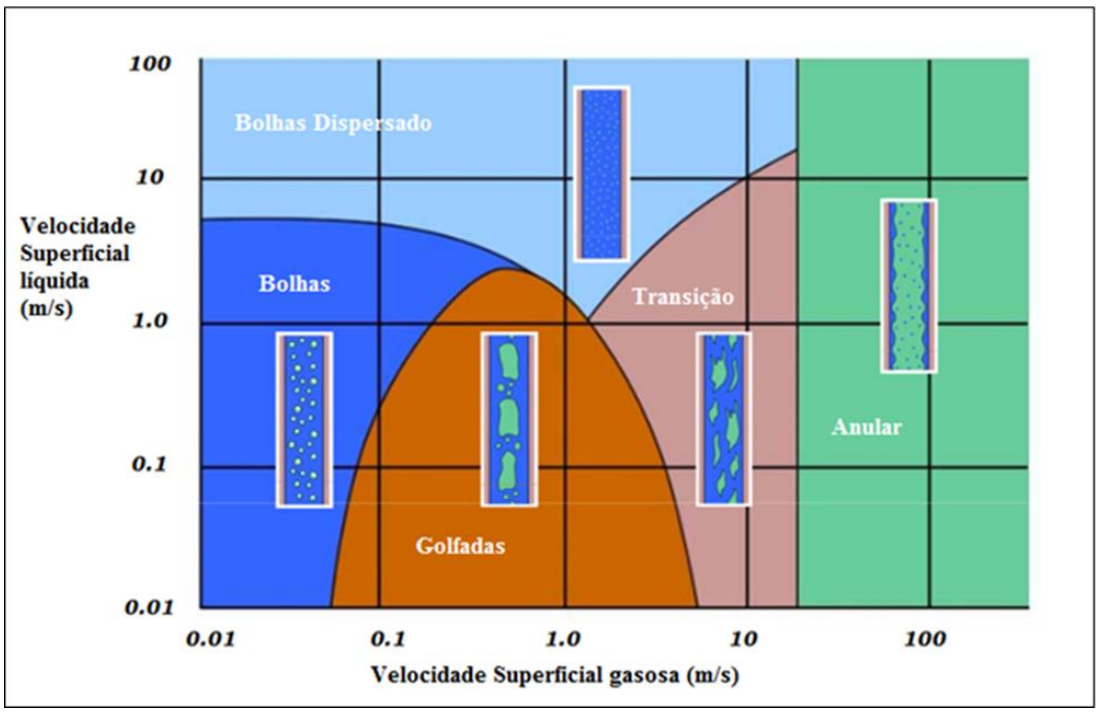


Figura 11: Mapa do Regime bifásico Vertical

Fonte: Adaptado de CORNELIUSSEN *et al.*, 2005.

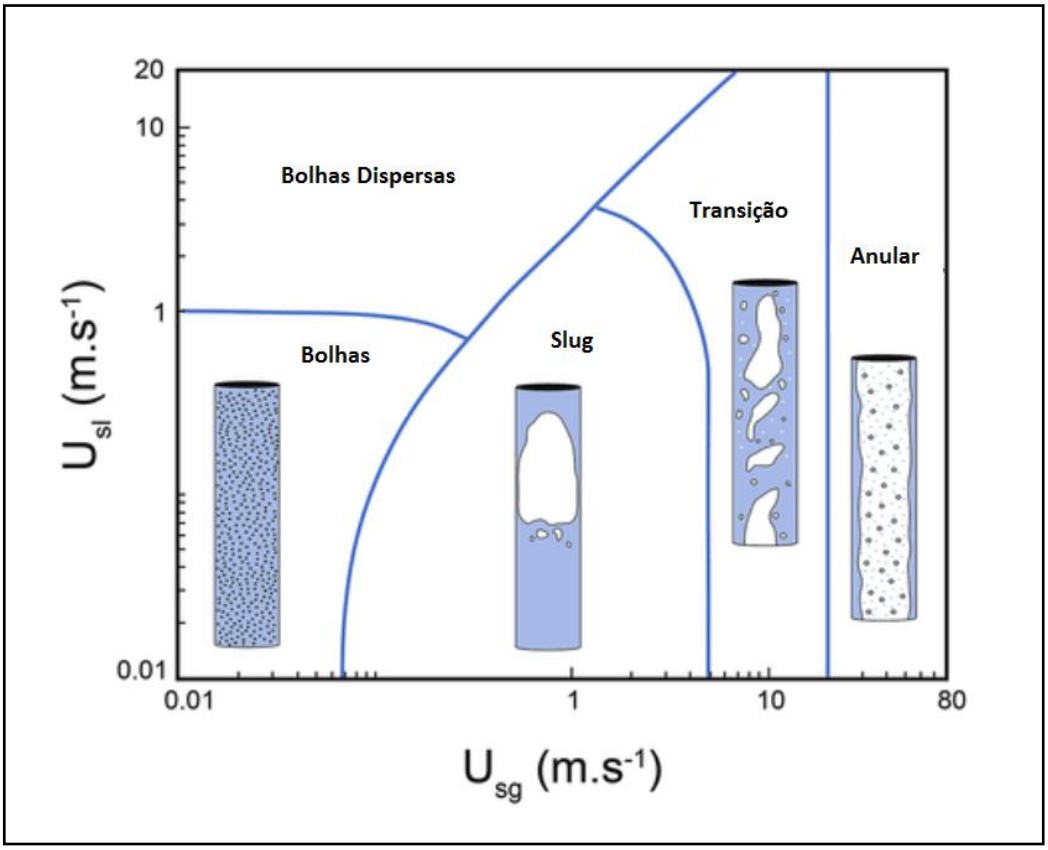


Figura 12: Mapa do Regime bifásico Vertical

Fonte: Adaptado de TAITEL *et al.*, 1980.

3. FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL (CFD):

Para se elaborar um estudo em CFD é necessário listar as variáveis desconhecidas, a geometria do sistema a ser estudada, as condições de contorno e as propriedades físico-químicas (BEISER, 2004). Além disso, pode-se estabelecer hipóteses simplificadoras, como por exemplo adotar condições estacionárias e/ou analisar o problema em 1, 2 ou 3 dimensões.

Posteriormente, é necessário construir o modelo matemático, equacionando as relações que governam o sistema (BRANSON E COSTA, 2006). Com isso, é possível construir o modelo numérico usando volumes finitos (BUCHANAN, 1995). Consequentemente, gerando um sistema de equações algébricas a serem resolvidas computacionalmente. (LEFRANÇOIS E BOUFFLET, 2010)

3.1. INTRODUÇÃO

O estabelecimento da ciência da dinâmica dos fluidos e sua aplicação estão em andamento desde a época de Newton. Neste sentido, o desenvolvimento teórico da fluidodinâmica computacional concentra-se na construção e solução das equações governantes e no estudo de várias aproximações dessas equações (FLETCHER, 1998).

No início da década de 1970, a maioria dos algoritmos numéricos foi desenvolvida como uma ferramenta alternativa para a execução dos experimentos físicos. Posteriormente, técnicas avançadas foram adicionadas e modelos mais abrangentes foram desenvolvidos para melhorar a capacidade dos códigos e pacotes CFD de simular com precisão os problemas complexos de fluxo de fluidos (HERNANDEZ-PEREZ, 2008).

Na posse de informações mais detalhadas sobre as características de um escoamento, o CFD é capaz de modelar escoamentos até para geometrias mais complexas. Além disso, SALEHI *et al*, (2018) afirma que com pacotes comerciais de CFD atualmente comercializados são capazes de simular escoamentos associados a outros fenômenos, como reações químicas, turbulência, escoamentos multifásicos e transferência de calor.

Cada problema físico a ser analisado apresenta características únicas, sendo necessário aplicar um tratamento matemático adequado. Dessa forma, torna-se crítico aplicar e desenvolver o entendimento técnico, baseando-se na quantificação da física do escoamento, na configuração da geometria, nas condições de contorno apropriadas e na interpretação apropriada dos resultados.

Para uma adequada quantificação da física do escoamento é necessário avaliar aspectos como a transferência de *momentum* entre fases ou se a força de arrasto induz um erro considerável na solução. Da mesma forma, a geometria tem um impacto significativo nos modelos. Adicionalmente, as condições de contorno apropriadas são fundamentais para resolver as características de fluxo correspondentes ao problema. Caso contrário, os resultados não descrevem o escoamento adequadamente (SALEHI *et al.,* 2018). Portanto, torna-se crucial entender os parâmetros que podem ser obtidos durante a solução dos problemas.

Existem diversos *softwares* de CFD disponíveis no mercado. No presente trabalho o estudo em CFD será modelado utilizando o *ANSYS Fluent*, programa que utiliza o método de volumes finitos (*Finite Volume Method* – FVM) para simular escoamentos. Nesta ferramenta é disponibilizada a aplicação de uma ampla lista de submodelos que podem atender a diferentes características do escoamento, como turbulência, transferência de calor, cinética química e propriedades de fluidos.

3.2. ABORDAGENS

Foram desenvolvidas na literatura diferentes abordagens de modelagem experimentais e matemáticas de escoamentos bifásicos: os métodos empíricos, analíticos, mecanicistas e numéricos (IBARRA *et al.*, 2017; e MUKHERJEE e BRILL, 1985). Os modelos empíricos são baseados em observações experimentais e correlações derivadas de medidas (DUNS E ROS, 1963; ORKISZEWSKI, 1967 e MUKHERJEE e BRILL, 1985). Os modelos analíticos são baseados na física do fenômeno do escoamento. No entanto, vários aspectos do escoamento de fluido são simplificados para obter uma solução de forma fechada para o problema (ZUBER e FINDLAY, 1965). Os modelos mecanicistas são uma combinação de análise empírica e tratamento analítico dos modelos (HASAN E KABIR, 1990; CAETANO *et al.*, 1992). Uma das formas mais avançadas para a caracterização do escoamento é a abordagem numérica (PARSI *et al.*, 2015). Embora o método numérico (como o CFD) seja computacionalmente intensivo, é capaz de fornecer uma melhor caracterização do escoamento.

3.3. EQUAÇÕES GOVERNANTES

A aplicação das leis fundamentais da mecânica a um fluido fornece as equações governantes.

Equação da conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \qquad (3.1)$$

Equações da conservação do *momentum* (direções x, y e z, respectivamente):

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) \qquad (3.2)$$

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) - \rho g \qquad (3.3)$$

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial z}+\mu(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}) \quad (3.4)$$

Onde:
ρ = massa específica do fluido;
u = velocidade do fluído na direção x;
v = velocidade do fluído na direção y;
w = velocidade do fluído na direção z;
t = tempo;
P = Pressão.

Essas equações formam um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares acopladas. Apesar de não ser possível resolver essas equações analiticamente, é possível obter soluções através de técnicas computacionais para as equações governantes para uma variedade de problemas de engenharia (BHASKARAN, 2019).

3.3.1. Contabilização dos efeitos da compressibilidade pelo *ANSYS Fluent*

Efeitos de compressibilidade ocorrem em escoamentos de gás em alta velocidade e/ou quando são identificadas grandes variações de pressão. Quando a velocidade do escoamento se aproxima ou excede a velocidade do som ou quando a mudança de pressão no sistema ($\Delta P/P$) é grande, a variação da massa específica do gás com a pressão tem um impacto significativo na velocidade do escoamento, pressão e temperatura. Sendo, assim, necessário se contabilizar o efeito da compressibilidade.

Escoamentos compressíveis são tipicamente caracterizados pela pressão total (P_0) e temperatura total (T_0) do escoamento. Para um gás ideal, essas quantidades podem ser relacionadas à pressão estática (P) e à temperatura (T) pela equação 3.5 a seguir:

$$\frac{P_0}{P}=\exp\left(\frac{\int_T^{T_0}\frac{C_p}{T}dt}{R}\right) \quad (3.5)$$

Quando *Cp* (calor específico) é constante, a Equação 3.5 se reduz a:

$$\frac{P_0}{P}=(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (3.6)$$

$$\frac{T_0}{T}=1+\frac{\gamma-1}{2}M^2 \quad (3.7)$$

Sendo γ a razão de calores específicos (*Cp/Cv*).

Essas relações descrevem a variação da pressão estática e da temperatura no escoamento à medida que a velocidade muda sob condições isentrópicas.

Os efeitos dos escoamentos compressíveis são automaticamente contabilizados nas equações padrão de continuidade e momento resolvidas pelo *ANSYS Fluent*.

Para escoamentos compressíveis, considerando lei dos gases ideais, a massa específica do fluido é calculada pela Equação 3.8 a seguir:

$$\rho = \frac{P_{op} + P}{\frac{R}{M_W}T} \qquad (3.8)$$

Onde *Pop* é a pressão de operação, *P* é a pressão estática local relativa à pressão de operação, *R* é a constante universal do gás e *Mw* é o peso molecular. A temperatura, *T*, é calculada a partir da equação da energia (ANSYS inc., 2020).

3.4. MODELO *VOLUME OF FLUID* (VOF)

O primeiro passo para resolver qualquer problema multifásico é determinar qual o modelo melhor representa seu escoamento. Para o regime de golfadas, o modelo VOF é o mais indicado segundo o guia teórico do *Fluent* (ANSYS INC., 2020).

A formulação VOF baseia-se no fato de que duas ou mais fases não são interpenetrantes. Para cada fase adicionada ao seu modelo, é introduzida uma variável: a fração de volume da fase na célula computacional. Neste sentido, em cada volume de controle, as frações de volume de todas as fases somam o valor unitário. Além disso, os campos para todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios de volume, desde que a fração de volume de cada uma das fases seja conhecida em cada local. Assim, as variáveis e propriedades em qualquer célula são puramente representativas de uma das fases, ou representativas de uma mistura das fases, dependendo dos valores da fração volumétrica (ANSYS INC., 2020).

O modelo VOF é uma técnica de rastreamento de superfície. Ele é projetado para dois ou mais fluidos imiscíveis onde a posição da interface entre os fluidos é de interesse. No modelo VOF, um único conjunto de equações de momento é compartilhado pelos fluidos e a fração de volume de cada um dos fluidos em cada célula computacional é rastreada em todo o domínio (ANSYS INC., 2020).

O modelo VOF considera a equação geral do momentum para uma solução. A equação do momentum é resolvida para velocidade compartilhada entre fases, o que torna o modelo vulnerável a diferenças substanciais de velocidade entre as fases. Da mesma forma, as equações de momentum e energia também são compartilhadas entre as fases, o que leva a um problema semelhante de imprecisão quando a diferença entre as temperaturas das fases é substancial (SALEHI et al., 2018).

3.5. MODELO DE TURBULÊNCIA: k-ε

Um dos modelos turbulentos amplamente utilizados para escoamentos água-ar é o modelo k-ε, onde o primeiro termo se à energia cinética turbulenta e o segundo, à taxa de dissipação de K, respectivamente. O modelo possui três tipos de formulações: padrão, RNG e *realizible*. As três formulações possuem formas semelhantes em termos de equações de transporte. No entanto, diferem entre si em termos de metodologia de cálculo para viscosidade turbulenta, números de *Prandtl* e termos de evolução na equação da taxa de dissipação.

O modelo padrão k- ε calcula a viscosidade turbulenta usando os valores obtidos para k e ε nas equações de transporte. O modelo usa constantes universais, derivadas com base em extensas experiências sobre escoamentos turbulentos. O modelo RNG é uma variação do modelo padrão, apresentando melhor eficácia na modelagem de escoamentos altamente tensos, sendo útil na previsão de movimentos de turbilhão e fluxos de baixo número de *Reynold* (SALEHI *et al.*, 2018). Já o modelo *realizable* satisfaz certas restrições matemáticas nas tensões de Reynolds, consistentes com a física dos fluxos turbulentos (ANSYS INC., 2020).

3.7. DISCRETIZAÇÃO E LINEARIZAÇÃO

A discretização consiste em dividir o domínio computacional em múltiplos volumes de controle ou células, gerando uma malha. Posteriormente, são aplicadas em cada uma das células as equações de conservação de massa e *momentum*, juntamente com as condições de contorno, gerando, assim, um sistema de equações algébricas não-lineares, de modo que cada equação algébrica será relacionada aos valores centrais das células vizinhas (BHASKARAN, 2019). Dessa forma, o problema é reduzido em determinar os valores de pressão e velocidade para cada centro de célula.

Para se resolver esse sistema de equações não-lineares é aplicada a linearização, a fim de se transformar esse sistema não-linear em linear. Assim, a linearização é feita com base em

valores estimados, resolvendo iterativamente. Dessa forma, os erros se tornam menores à medida que termos de correção se tornam menores (BHASKARAN, 2019).

Para se reduzir os erros da discretização, deve-se fazer um refinamento da malha, utilizando mais células no domínio. Além disso, os erros de discretização podem diminuir ao se aumentar a acurácia da interpolação.

Em uma solução exata, os resíduos dos balanços de massa e momentum serão zero. Entretanto, o processo de linearização acrescenta erros, causando perturbações. Dessa forma, os resíduos nunca atingirão o zero, mas abaixo de uma tolerância. Além disso, as iterações se tornam mais difíceis à medida que a malha é refinada (BHASKARAN, 2019).

3.8. PRINCIPAIS ETAPAS

Os problemas de CFD podem ser divididos em três macro etapas: o pré-processamento, processamento, pós-processamento e validação.

3.8.1. Pré-processamento

Nesta etapa são definidos os dados de entrada requeridos pelo *solver*. Dessa forma, são selecionados os modelos físicos para resolução dos problemas, assim como são especificadas as propriedades termodinâmicas, características do fluido, do sólido e as condições de contorno (VERSTEEG E MALALASEKERA, 1995).

3.8.2. Processamento

A resolução de um problema de CFD é feita através da integração das equações diferenciais parciais em todo o volume de controle da região de interesse (VERSTEEG E MALALASEKERA, 1995). Isso é equivalente a aplicar a lei de conservação da massa ou quantidade de movimento para cada volume de controle.

Estas equações integrais são convertidas para um sistema de equações algébricas pela geração de uma série de aproximações para os seus termos e resolvidas iterativamente. A abordagem iterativa é requerida devido à natureza não-linear das equações, e quando essa solução se aproxima da solução exata, é dito que ela converge (VERSTEEG E MALALASEKERA, 1995). Para cada iteração, são notificados resíduos das variáveis controlada, servindo como um indicador geral da conservação das propriedades do escoamento. Sendo que resíduos são a diferença entre o lado esquerdo e o lado direito das equações somados sobre todas as células do domínio

O quão perto a solução final está da solução exata depende de uma série de fatores, incluindo o tamanho e a forma dos volumes de controle e da malha.

3.8.3. Pós-processamento

O pós-processador é o componente usado para analisar, visualizar e apresentar os resultados obtidos. O pós-processamento inclui desde a obtenção de valores em determinados pontos, até complexas animações (VERSTEEG E MALALASEKERA, 1995).

Exemplos de algumas importantes características do pós-processador são:

- Plotagem de vetores apresentando direção e magnitude de propriedades do escoamento;
- Visualização de variações de variáveis escalares, tais como temperatura pressão e velocidade através do domínio;
- Animações;
- Visualização de forma gráfica, como a obtenção do perfil de velocidade de determinado escoamento ao longo de determinado eixo.

3.8.4. Verificação e validação

Após a solução do problema através do CFD é necessário verificar e validar os resultados, avaliando a consistência do resultado da simulação (BHASKARAN, 2019).

Processo Verificação é utilizado para quantificar o erro numérico, avaliando a precisão do modelo matemático resolvido numericamente. Possuindo um carácter puramente matemático, não tendo como objetivo o fenômeno real. Por outro lado, o processo de validação é utilizado para quantificar o erro de modelagem. Possuindo um caráter puramente físico, a fim de avaliar o quão bem o modelo matemático representa a realidade.

Exemplo:

Comparação dos resultados obtidos na simulação com dados experimentais. HERNANDEZ-PEREZ (2008) utilizou um sistema de vídeo de alta velocidade para obter uma sequência de imagens do escoamento de um teste de bancada. Como resultado, foi possível identificar (Figura 13) que o formato da bolha observada nas imagens de vídeo é bem similar à prevista na simulação, com velocidades de propagação equivalentes. Dessa forma, os resultados obtidos por HERNANDEZ-PEREZ (2008) indicam que a modelagem do escoamento do tipo *slug* no CFD gerou resultados consistentes com dados experimentais; portanto, indicando que o CFD é capaz de prever o comportamento de um fluxo bifásico.

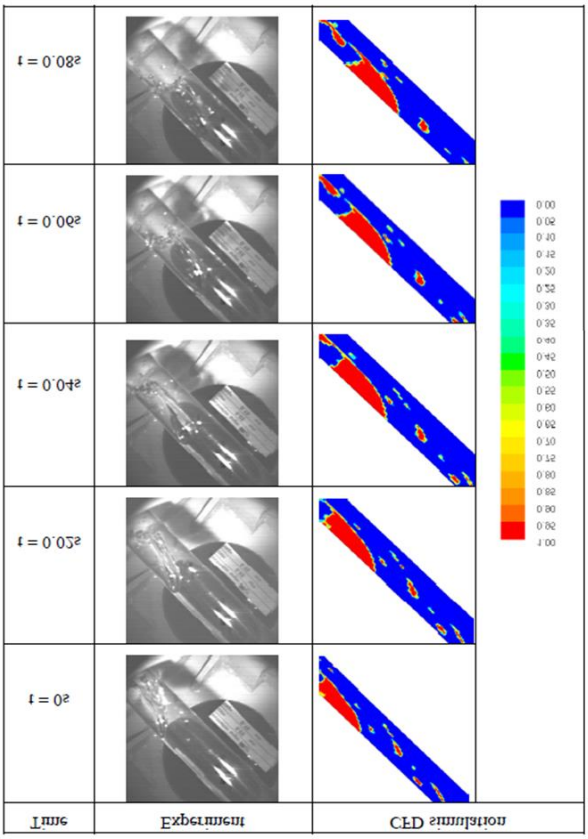


Figura 13: Comparação entre imagens de resultados experimentais e de CFD.
Fonte: HERNANDEZ PEREZ, 2008.

Na Figura 13 as regiões em vermelho representam ar; já as regiões em azul, representam a água. Observa-se os contornos de distribuição de gás para uma tubulação com 45º de inclinação, onde são comparados resultados experimentais com numéricos.

3.8.5. Estudo de malha

A malha aplicada no problema a ser analisado exerce grande influência na convergência do *solver* e na solução de simulações em CFD. Dessa forma, uma malha de boa qualidade aumenta a precisão da solução e melhora a convergência em relação a uma malha de baixa qualidade. Portanto, é decisivo manter altos padrões de qualidade na malha a ser utilizada, a fim de se garantir a convergência e a precisão da simulação.

HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR (2010) discutem dificuldades enfrentadas na geração de malhas para simulação de escoamento bifásico utilizando CFD. No referido trabalho, é feito um experimento onde um escoamento de ar e silicone é alimentado na entrada

(*inlet*) do tubo. A mistura bifásica flui ao longo da tubulação e é finalmente descarregada pela saída à pressão atmosférica. O domínio computacional foi inicialmente preenchido com a fase líquida e a fase gasosa é introduzida a partir do fundo do tubo. Além disso, a condição do escoamento bifásico foi simulada utilizando o modelo de Volume de Fluido (VOF), levando em consideração os efeitos de turbulência usando o modelo k- ε.

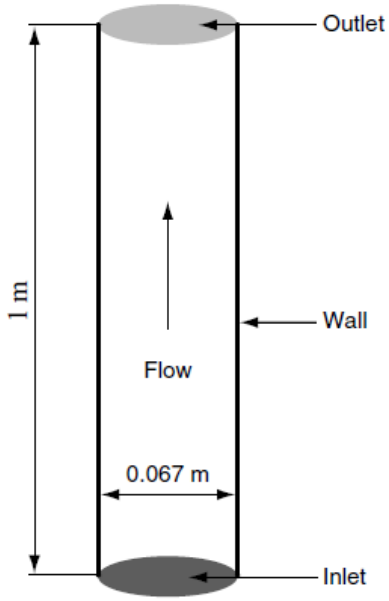


Figura 14: Geometria do domínio computacional
Fonte: HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR, 2010.

A fim de se comparar a influência da malha na simulação do escoamento, foram escolhidas quatro estruturas de malha diferentes (Figura 15):

- **Malha polar cilíndrica (*O-grid.*):** neste tipo de grade, existe uma família de linhas formando círculos concêntricos ao redor do centro do cilindro e uma outra família de linhas direcionadas radialmente.
- **Malha borboleta (*butterfly-grid):*** Uma malha cartesiana é usada no centro do tubo combinada com uma malha cilíndrica ao redor. Requer vários blocos, mas geralmente possui a melhor qualidade de grade em termos de ortogonalidade e densidade de malha.
- **Malha retangular H (*rectangular H-grid*):** é formada por linhas de grade ortogonais. Isso pode ser empregado para adaptar topologicamente uma única grade retangular a uma forma circular.
- **Malha pavimentada não estruturada:** se ajusta à área da seção transversal circular do cilindro e a grade de pavimentação. Nesse caso, as células são organizadas de maneira

arbitrária para preencher a seção transversal do domínio computacional, os pontos de malha não são conectados a uma topologia regular e não podem ser descritos com uma função entre o número de células e o número de seus vizinhos.

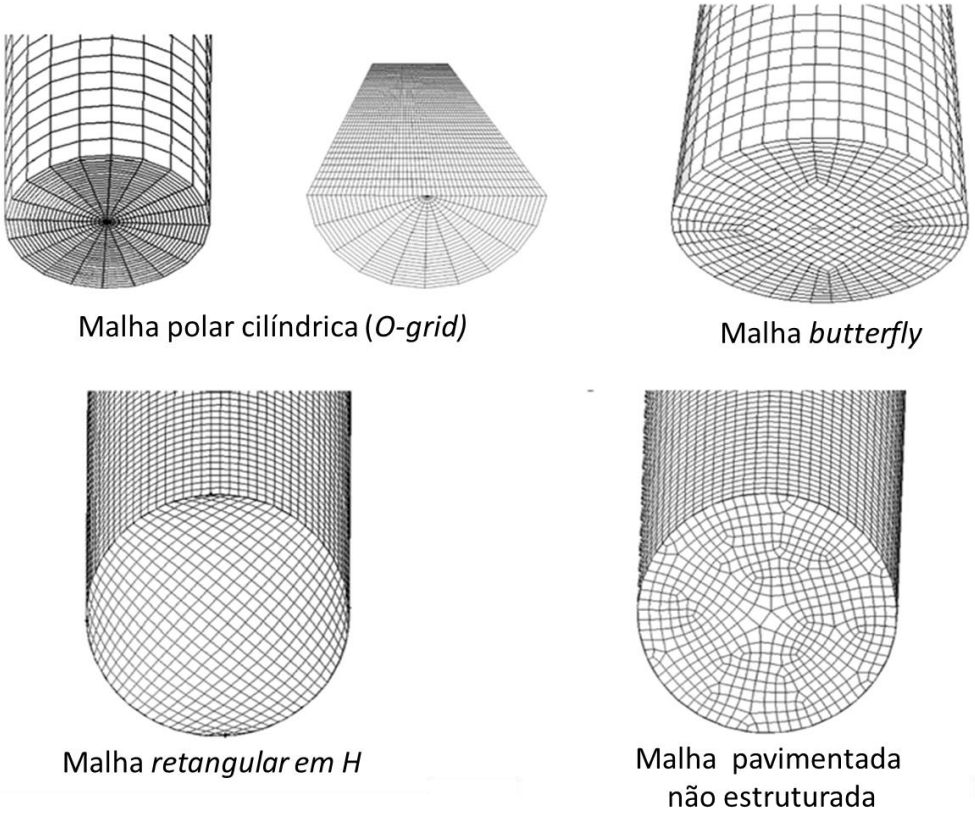


Figura 15 - Grids utilizados no estudo de malha.
Fonte: Adaptado HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR, 2010.

Como o domínio computacional foi inicialmente preenchido com a fase líquida, e a fase gasosa é introduzida a partir do fundo do tubo, para fins da análise de influência da malha, HERNANDEZ-PEREZ E ABDULKADIR (2010) compararam os resultados obtidos para o campo de velocidade em uma seção distante do fundo, logo após alguns intervalos de tempo, no início da simulação. Como nesse momento a tubulação está ocupada somente pela fase líquida, configura-se um cenário momentâneo de escoamento monofásico. Como resultado, foi observada uma diferença no formato dos vetores velocidade a depender da malha empregada. Para o caso malha polar cilíndrica (*O-grid*), o perfil de velocidade parabólica não é claramente atingido; em vez disso, o perfil de velocidade é quase plano, assemelhando-se ao escoamento turbulento. Por outro lado, para malha *butterfly*, foi observado o perfil de velocidade parabólico, conforme fisicamente esperado.

A Figura 16 expõe resultados da simulação obtidos para a distribuição de fases para as diferentes malhas, juntamente de imagens de resultados experimentais apresentados por ABDULKAREEM et al. (2009). Na simulação foram empregadas as mesmas condições de escoamento do teste de bancada. As fases líquida e gasosa são representadas por cores escuras e claras, respectivamente.

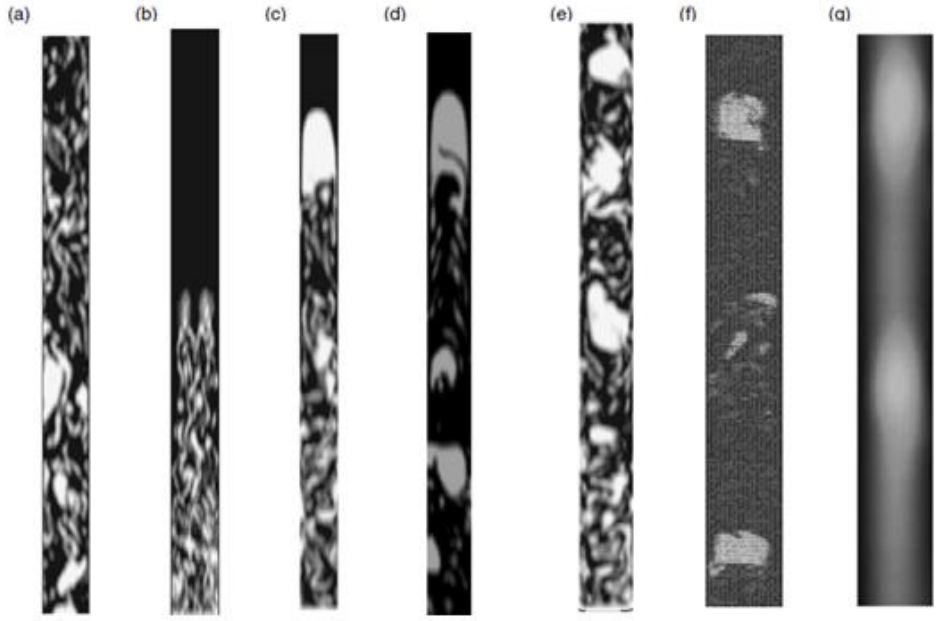


Figura 16: Contornos da distribuição de fases sob as mesmas condições de contorno.
Fonte: HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR, 2010.

a) Malha polar cilíndrica completa (*O-Grid*);
b) Malha meio polar cilíndrica (*O-Grid*);
c) Malha retangular H;
d) Malha pavimentada não estruturada;
e) Malha borboleta;
f) Resultado experimental: *Wire Mesh Sensor* (WMS);
g) Resultado experimental: *Electrical Capacitance Tomography* (ECT);

HERNANDEZ-PEREZ E ABDULKADIR (2010) indicam que, embora no resultado experimental a fase gasosa flua no centro do tubo na parte inferior, no caso das malhas polar cilindricas O-grid (“a” e “b”), foi verificado que a fase gasosa se move aleatoriamente para os lados.

Além disso, HERNANDEZ-PEREZ E ABDULKADIR (2010) ponderam que apesar dos resultados obtidos com as malhas retangular H (c) e pavimentada não estruturada (d) serem razoáveis, quando a malha é mais refinada, a assimetria aumenta nas células das extremidades, prejudicando os resultados.

Por outro lado, a malha *butterfly* (e) é a que que apresentara a melhor concordância com os obtidos experimentalmente por ABDULKAREEM et al. (2009). Essa melhor performance é explicada pois esse tipo de malha oferece células de melhor proporção e com assimetria limitada. Complementarmente, permite uma boa representação da camada limite e é adequadamente esticada ao longo do eixo longitudinal. Sendo o tipo de malha mais recomendado para a simulação de escoamento bifásico em um tubo.

4. METODOLOGIA DA PESQUISA

4.1. INTRODUÇÃO

Para seleção de qual geometria ser utilizada e quais cenários seriam simulados, RAEDER (2012) foi tido como base. Nessa dissertação foram realizados testes de bancada nas dependências do Laboratório de Vibrações e Automação da Universidade Federal Fluminense (Figuras 17). Para isso, foi utilizado um tubo de acrílico, conduzindo misturas de água e ar em diversas combinações de fração volumétrica e de velocidade de escoamento.

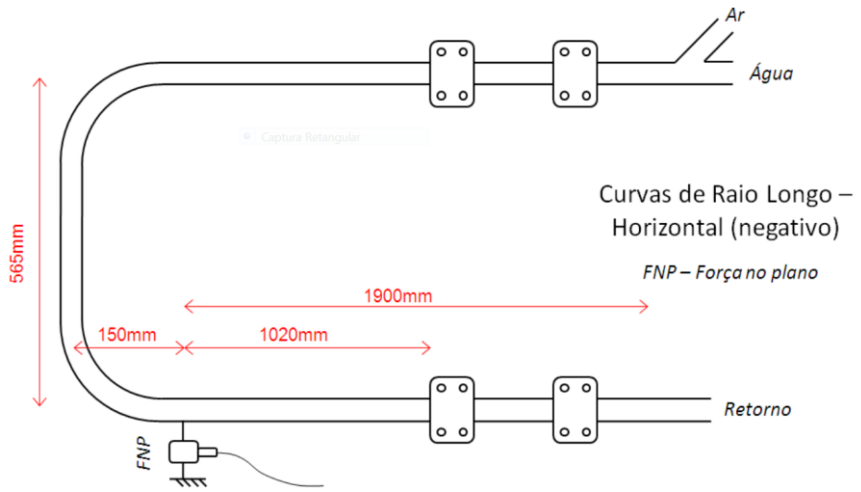


Figura 17 - Dimensões gerais dos tubos para os ensaios de força dinâmica na horizontal.
Fonte: RAEDER, 2012.

Primeiramente foram selecionados seis cenários de injeção para simulação em uma malha tetraédrica, menos elaborada, porém demandando menor custo computacional e tempo de simulação. O objetivo dessas primeiras simulações foi averiguar quais regimes de escoamento são identificados, fazendo uma análise qualitativa-visual dos resultados, avaliando principalmente o comportamento dos bolsões de ar ao longo da tubulação.

Posteriormente, para fins de análise de sensibilidade de malha e posterior validação, foram selecionados dois casos para que então seja feita uma nova simulação, porém utilizando a malha do tipo *butterfly*, mais sofisticada, refinada e adequada para padrão de escoamento em

golfada, conforme indicado por HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR (2010). Porém demandando maior custo computacional e tempo de simulação mais dilatado.

4.2. INFRAESTRUTURA UTILIZADA

As simulações foram feitas utilizando uma versão acadêmica do *software Ansys Fluent* Versão acadêmica 2021.

Para isso, foram utilizadas duas máquinas pertencentes ao Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD) da UFF. Tais computadores possuem as seguintes configurações:

Máquina 1

- Sistema Operacional: Windows 10;
- Processador: Intel (R) Core (TM) i9;
- Memória Instalada: 16Gb;
- Número de núcleos: 8;
- Processadores Lógicos: 16;
- Placa de Vídeo: NVIDIA GeForce GTX 1050.
- Capacidade de armazenamento: SSD de 256Gb e HD de 1Tb.

Máquina 2

- Sistema Operacional: Windows 10;
- Processador: Intel (R) Core (TM) i5;
- Memória Instalada: 8Gb;
- Número de núcleos: 6;
- Processadores Lógicos: 6;
- Placa de Vídeo: NVIDIA GeForce GT 1030.
- Capacidade de armazenamento: SSD de 256Gb e HD de 1Tb.

4.3. MODELO SIMULAÇÃO

4.3.1. Geometria

O problema que será analisado consiste em uma tubulação de 19,5 mm de diâmetro interno. O Arranjo da tubulação se encontra no plano horizontal, com o vetor aceleração da gravidade apontando no sentido negativo da direção y. Existem duas superfícies de entrada, uma na horizontal, onde é injetada água; e outra obliqua, onde é injetado ar. Além de uma superfície de saída, conforme ilustrado na Figura 18, a seguir:

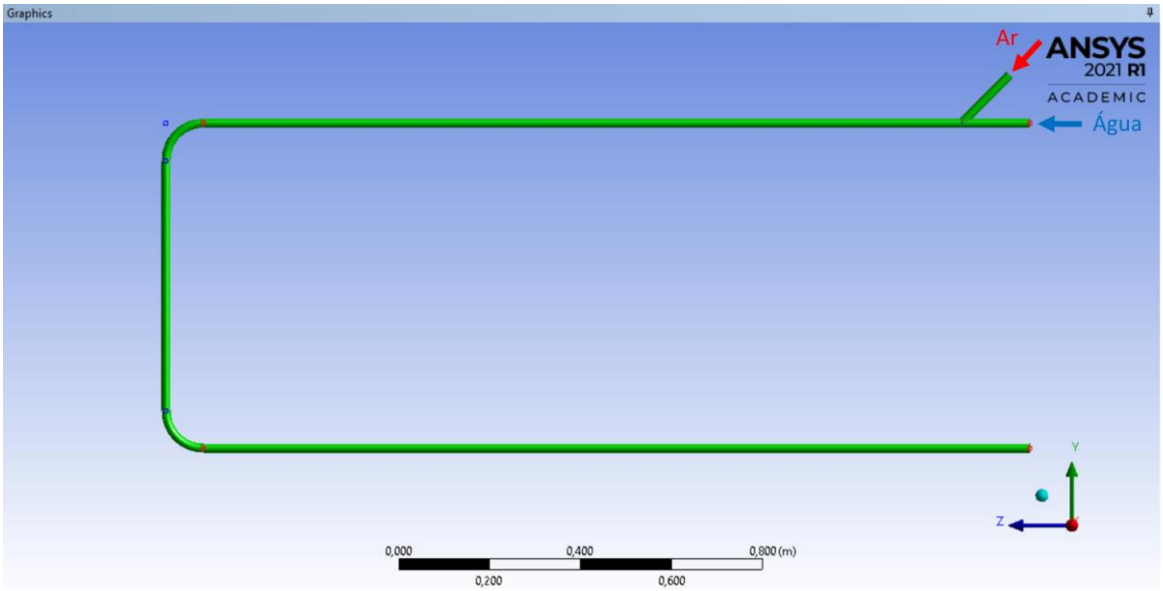


Figura 18- Geometria da tubulação analisada

4.3.2. Cenários de injeção simulados

Com o objetivo de se obter o *slug*, foram escolhidos seis cenários para simulação, dentre os testados por RAEDER (2012), tendo como base as velocidades de injeção nos *inlets* de água e ar. Tais pontos foram plotados na Figura 19 a seguir no Mapa do Regime Bifásico Horizontal proposto por MANDHANE et al. (1974) e transcritos na Tabela 1:

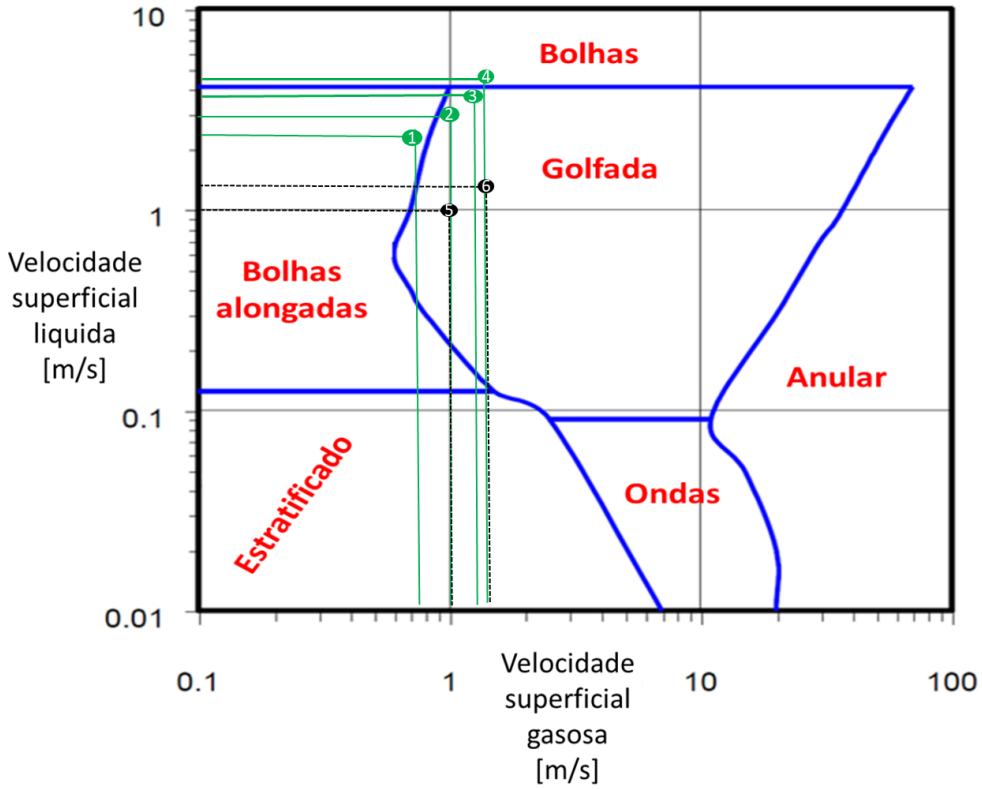


Figura 19 - Mapa de Escoamento com pontos alvo da simulação no mapa do regime bifásico horizontal

Fonte: Adaptado de MANDHANE *et al.*, 1974.

Tabela 1 - Pontos alvo da simulação no mapa do regime bifásico horizontal

Pontos	V_{H20} [m/s]	V_{ar} [m/s]	Q_{H20} [m³/s]	Q_{ar} [m³/s]	β	j [m/s]
1	2,25	0,75	0,002687829	0,000895943	0,25	3
2	3,00	1,00	0,003583772	0,001194591	0,25	4
3	3,75	1,25	0,004479715	0,001493238	0,25	5
4	4,50	1,50	0,005375658	0,001791886	0,25	6
5	1,00	1,00	0,001194591	0,001194591	0,5	2
6	1,50	1,50	0,001791886	0,001791886	0,5	3

Fonte: Adaptado de RAEDER, 2012.

A vazão calculada é referente à cada *inlet* (de ar e água), possuindo diâmetro interno (d) de 19,5 mm.

$$Q = V_{inj} * A = \frac{V_{inj} * d_{interno}^2}{4}$$

Além disso, β é definido como fração volumétrica de ar, sendo calculado da seguinte maneira:

$$\beta = \frac{Q_{ar}}{Q_{H20} + Q_{ar}}$$

Q_{ar}= Vazão de ar

Q_{H20}= Vazão de água

Além disso, na tabela também é apresentado *j*, definido como velocidade da mistura:

$$j = \frac{Q_{H20} + Q_{ar}}{A} = V_{H20} + V_{ar}$$

Para seleção dos casos, dentre os testados experimentalmente por RAEDER (2012), foi dada preferência por pontos nas proximidades das zonas de transição entre os padrões de escoamentos em bolhas, golfadas e bolhas alongadas, a fim de melhor avaliar o comportamento dos regimes de escoamento nesta região, segundo o mapa de MANDHANE et al. (1974). Além disso, foram escolhidos casos com velocidades de injeção mais baixas.

Seguindo o gráfico proposto por MANDHANE et al. (1974), pelas velocidades de injeção em cada *inlet*, os casos 1,2,3 e 4 (β=25%) estariam na região de transição entre como bolhas/bolhas alongadas/golfada, enquanto que os casos 5 e 6 (β=50%), estariam classificados como golfada.

4.3.4. Configuração do modelo

Nesta etapa são definidos os modelos e as premissas adotadas na simulação.

O tipo de *solver* selecionado foi baseado na pressão e com regime transiente. Além disso, a gravidade (9.81 m/s²) foi adota no sentido negativo do eixo y.

O domínio computacional foi inicialmente preenchido com água em repouso.

Seguindo diversas publicações de referência, simulando o escoamento em golfada, como ABDULKADIR *et al*. (2015), HERNANDEZ-PEREZ (2008) e ABDULKAREEM *et al.* (2009), foi adotado o modelo *Volume of Fluid* (VOF), por ser o mais adequado para se

reproduzir o escoamento *slug*. Neste método, todas as variáveis e propriedades são compartilhados pelas fases e representam valores médios de volume, desde que a fração de volume de cada uma das fases seja conhecida em cada local. Portanto, um único conjunto de equações é resolvido por meio do domínio de fluxo, que são dependentes das frações de volume de todas as fases por meio das propriedades de massa específica e viscosidade (HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR, 2010).

Um parâmetro fundamental para a VOF é a tensão superficial, definida como o resultado de um desequilíbrio das forças de atração entre as moléculas na interface entre dois fluidos. No modelo VOF, a tensão superficial é introduzida como uma força de corpo agindo nas células da malha que contêm a interface (HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR, 2010). Além disso, a queda de pressão nas superfícies depende do valor da tensão superficial. Como neste estudo estão sendo utilizados água e ar, foi adotada a tensão superficial constante de 0,072 N/m, valor tabelado para a interface entre estes fluidos.

Complementarmente, é imprescindível que a turbulência seja considerada na simulação numérica. Isso é justificado pois espera-se que ocorra um gradiente de alta velocidade na interface gás-líquido, com o gás se movendo muito mais rápido do que a fase líquida (HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR, 2010). Para considerar a turbulência, seguindo diversas publicações de referência, simulando o escoamento em golfada, como ABDULKADIR *et al*. (2015), HERNANDEZ-PEREZ (2008) e ABDULKAREEM *et al.* (2009), foi adotado o modelo *realizable* do k-ε.

Com o objetivo de se controlar a solução geral, foi empregado algoritmo PISO, devido ao seu bom desempenho para encontrar uma solução convergente mais rapidamente.

Além disso, para o esquema de solução de um escoamento transiente, o principal fator de controle da solução é o intervalo de tempo. A cada intervalo de tempo são realizadas iterações para resolver as equações governantes para aquele intervalo de tempo, determinando o quão rápido ou lento o cálculo progride. Se um grande intervalo de tempo for selecionado, grandes mudanças serão refletidas na solução, causando instabilidade, e, portanto, podendo induzir à divergência. Sendo assim, esse parâmetro deve ser definido de modo que seja pequeno o suficiente para a convergência da solução. Por outro lado, quanto menor o intervalo de tempo, mais iterações são necessárias, demandando maior custo computacional e mais tempo de processamento. Os intervalos de tempo empregados nas simulações de todos os casos variaram de 0,0001 à 0,0005 dependendo das condições de escoamento e convergência do *solver*.

4.3.3. Malhas

4.3.3.1. Malha tetraédrica

Com o objetivo de se otimizar o tempo e a capacidade de processamento disponíveis, os primeiros seis casos selecionados foram rodados em uma malha tetraédrica, menos refinada. Entretanto, especial atenção foi dada para às superfícies de entrada e saída, onde foram aplicados refinamentos. Fato que pode ser visualizado nas Figuras 20 e 21, onde existe um maior adensamento de malha nas proximidades dos *inlets* de água e ar. Além disso, tal refinamento pode ser também observado comparando as Figuras 21 e 22, onde, respectivamente, a malha na superfície de injeção de água apresenta uma maior adensamento de elementos do que em uma seção transversal da malha em trecho ao longo da tubulação.

Tal refinamento foi empregado com objetivo de se evitar a ocorrência de fluxo reverso nessas fronteiras durante os primeiros intervalos de tempos da simulação. O fluxo reverso traria fortes impactos na convergência do termo da continuidade, devido a distúrbios causados no equacionamento da conservação de massa, podendo levar à divergência dos resultados e cessação dos cálculos.

A malha tetraédrica gerada possui 78233 nós e 350780 elementos.

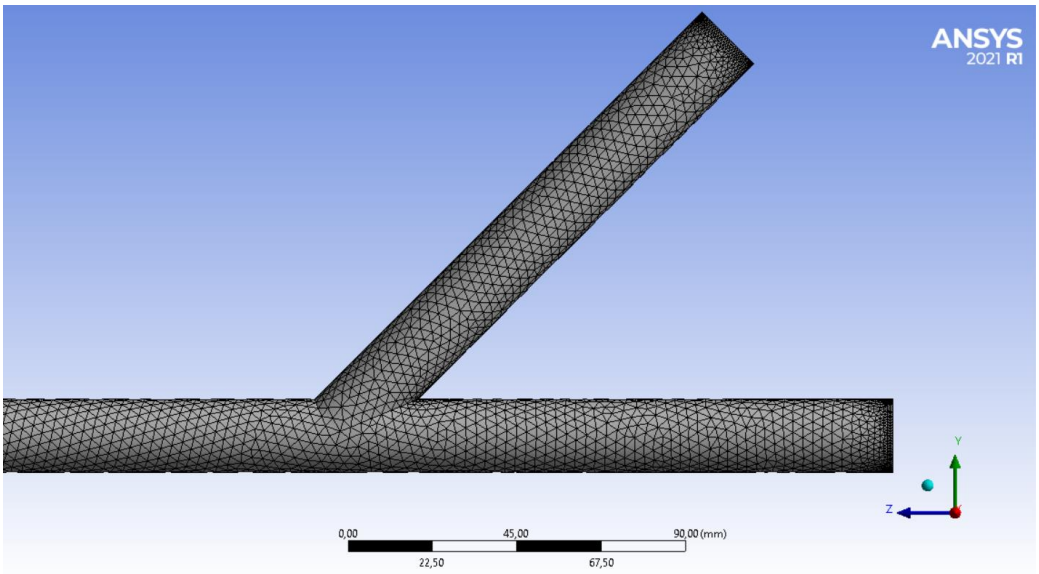


Figura 20 - Região da malha tetraédrica próximas aos *inlets*

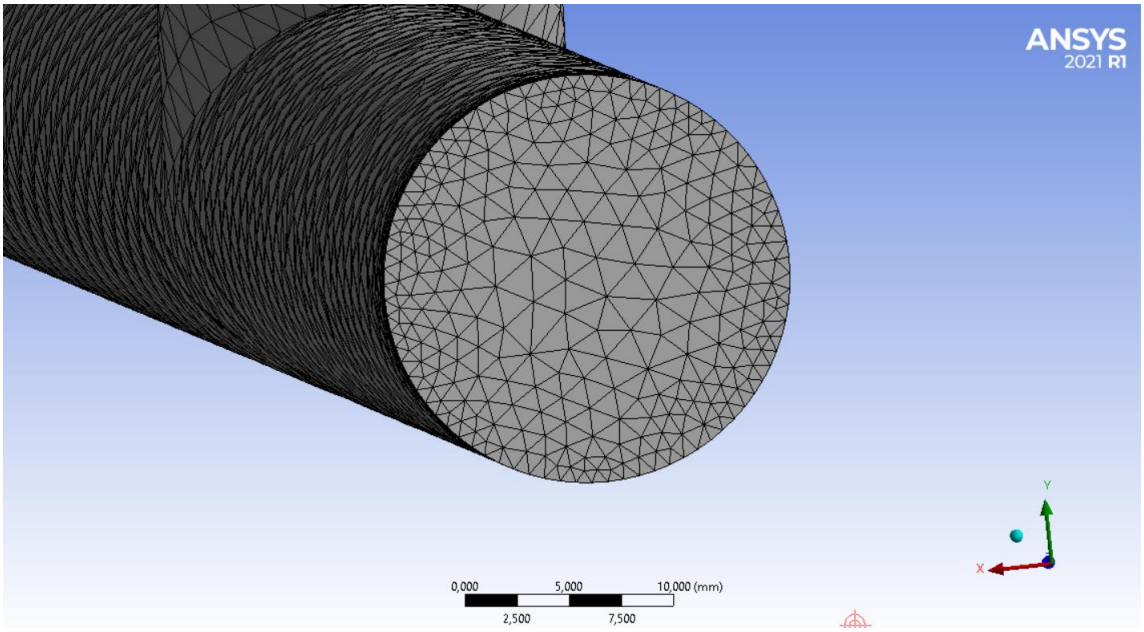


Figura 21 – Malha tetraédrica na superfície de injeção de água

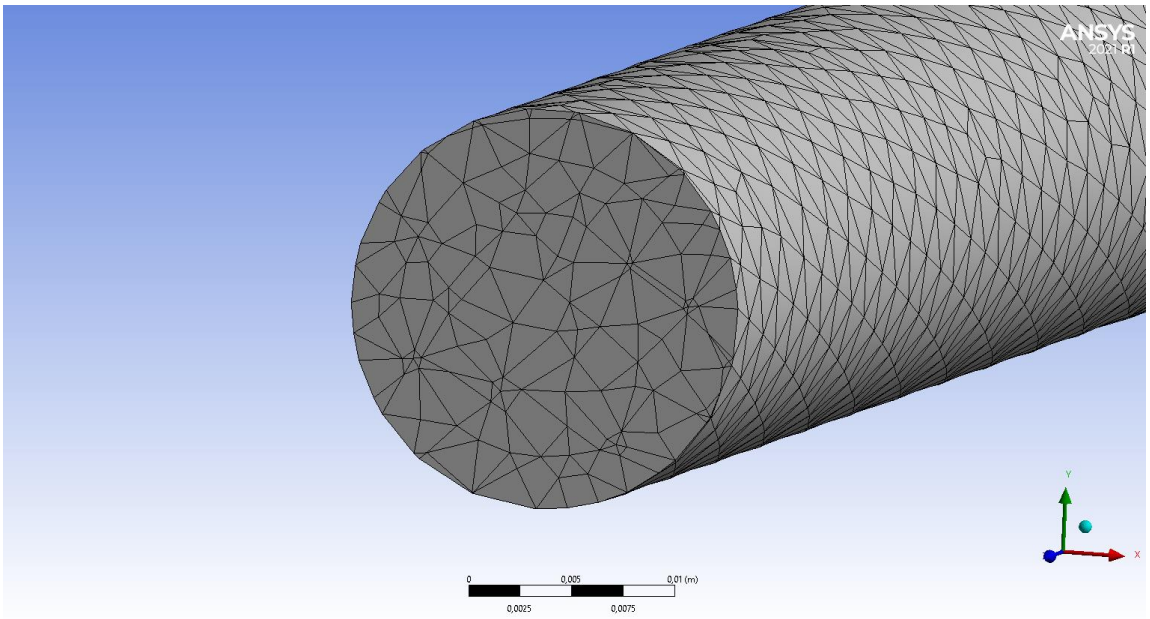


Figura 22 - Seção transversal da malha tetraédrica em trecho ao longo da tubulação

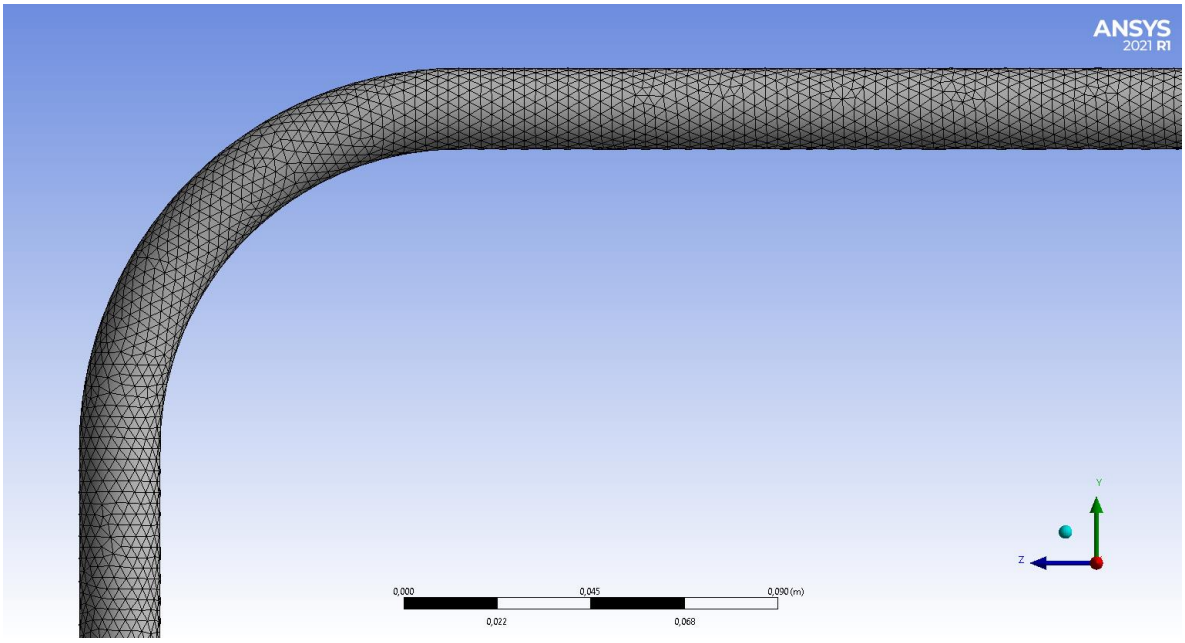


Figura 23 - Trecho da malha tetraédrica em região nas proximidades da primeira curva da tubulação

4.3.3.2. Malha *Butterfly*

Diferentes tipos de malhas apresentam vantagens e desvantagens relacionadas ao custo computacional que será demandado e ao processo de geração do *grid*. Além disso, a convergência e a precisão da simulação e o comportamento do escoamento possuem forte dependência da malha empregada. Sendo assim, é essencial se manter altos padrões de qualidade da malha para garantir resultados adequados.

Ao fim desses seis resultados, serão selecionados dois casos para que então sejam simulados novamente, porém utilizando a malha do tipo *butterfly*, mais adequada para o padrão de escoamento em golfadas, conforme indicado por HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR (2010).

A construção dessa malha requer um procedimento mais elaborado. Para isso, é utilizada uma combinação de uma malha cartesiana no centro do tubo com uma cilíndrica ao seu redor, resultando em um *grid* de 5 faces estruturadas (4 lados e 1 núcleo) dentro de um círculo. Deste modo, a topologia gerada apresenta melhor qualidade em termos de ortogonalidade e densidade de malha.

Tabela 2 – Número de elementos e nós Malha tetraédrica e *Butterfly*

	Elementos	Nós
tetraédrica	78233	350780
Butterfly	1047580	1193439

Fonte: Elaboração própria

A malha gerada possui 1047580 nós e 1193439 elementos. Dessa maneira, além da malha *butterfly* oferecer melhor uniformidade, com o refinamento a quantidade de nós foi aumentado em 1139% e o número de elementos em 340%.

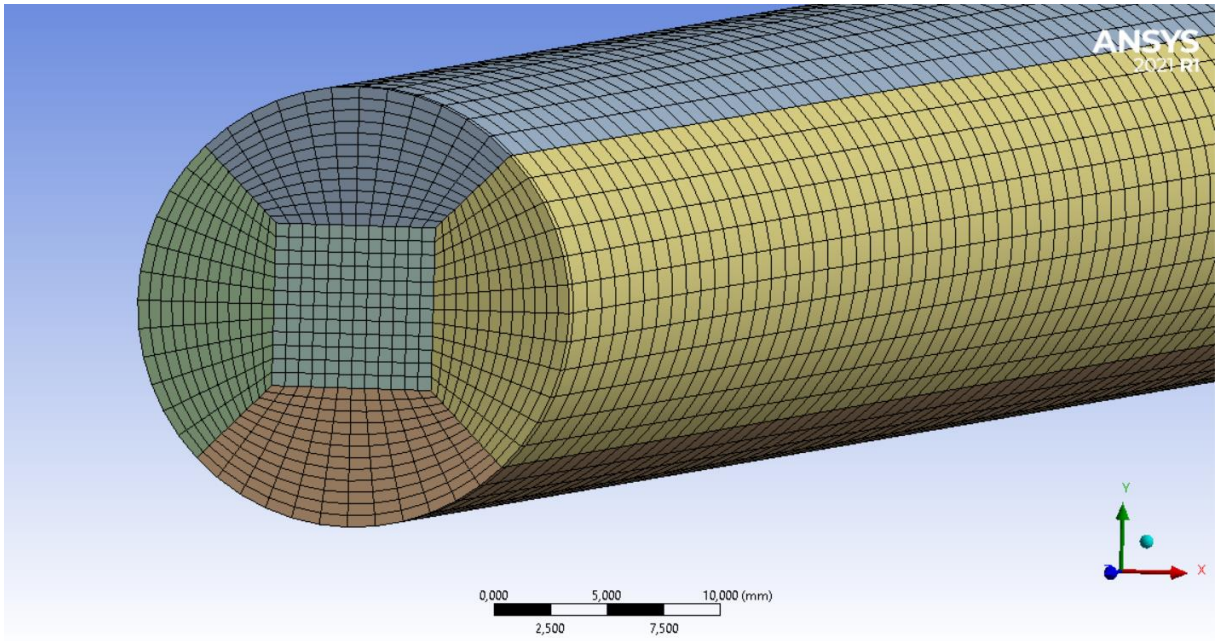


Figura 24 - Seção transversal da malha *butterfly* em trecho ao longo da tubulação

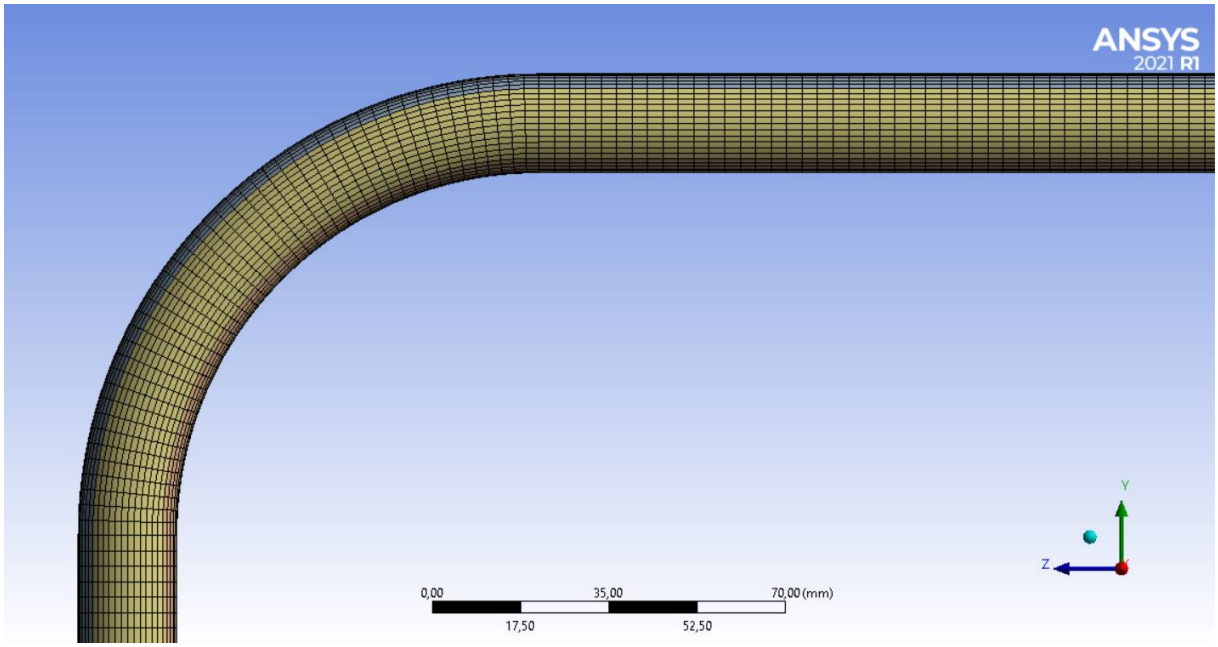


Figura 25 - Trecho da malha *butterfly* em região nas proximidades da primeira curva da tubulação

A melhor uniformidade da malha pode ser visualizada comparando as Figuras 22 e 24, das seções transversais ao longo da tubulação da malha tetraédrica e a *butterfly*, respectivamente. De maneira análoga, outra comparação interessante a se fazer é entre as figuras 23 e 25, onde são exibidos trecho em regiões nas proximidades da primeira curva da tubulação na malha tetraédrica e a a *butterfly*, respectivamente.

5. RESULTADOS E VALIDAÇÃO

5.1. CONTORNOS DE FRAÇÃO DE VOLUME DE AR

5.1.1. Malha tetraédrica

Com o objetivo de se comparar os padrões de escoamentos formados em cada cenário de injeção, o primeiro item a ser conferido serão os contornos da fração de volume de ar e água. Nesta representação, seguindo a coloração do *Fluent*, as regiões em vermelho representam ar; já as regiões em azul, representam a água.

Para cada cenário de injeção foram feitas imagens de 3 regiões da tubulação, Figura 26 a seguir. Uma focando no primeiro trecho horizontal, com o objetivo de se verificar a formação dos bolsões de ar. Já as outras duas imagens foram focando nas regiões de curva da tubulação, onde se concentram os esforços induzidos pelo escoamento. Importante ressaltar que todas as imagens foram feitas após 2 segundos em tempo real de simulação.

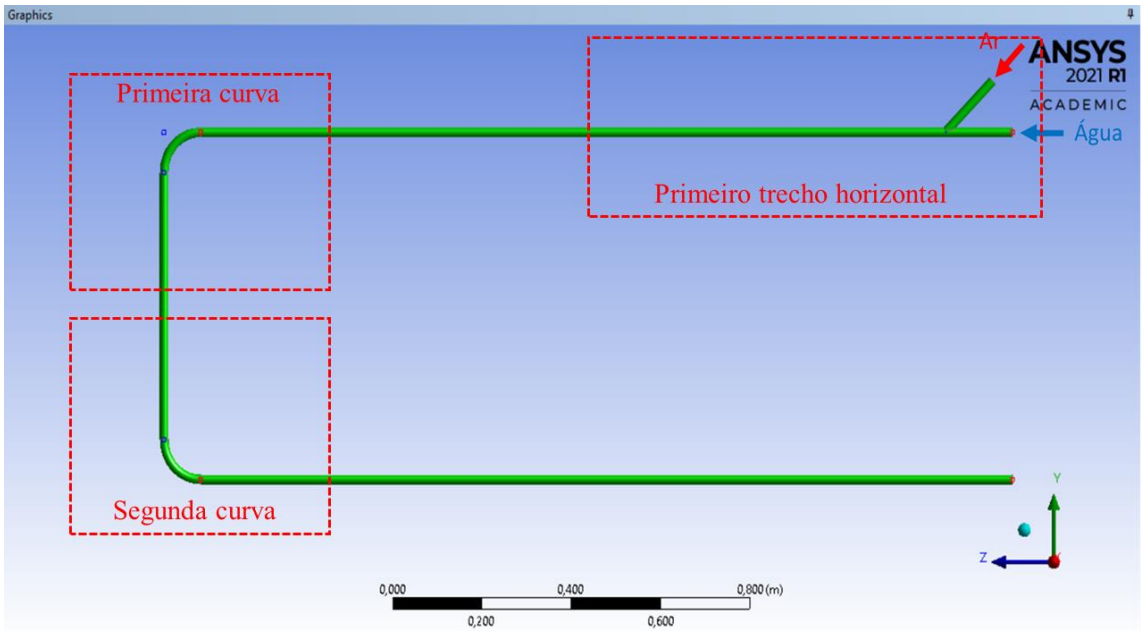


Figura 26 - Trechos onde foram analisados as frações de volume

A seguir estão representadas as figuras do primeiro trecho horizontal:

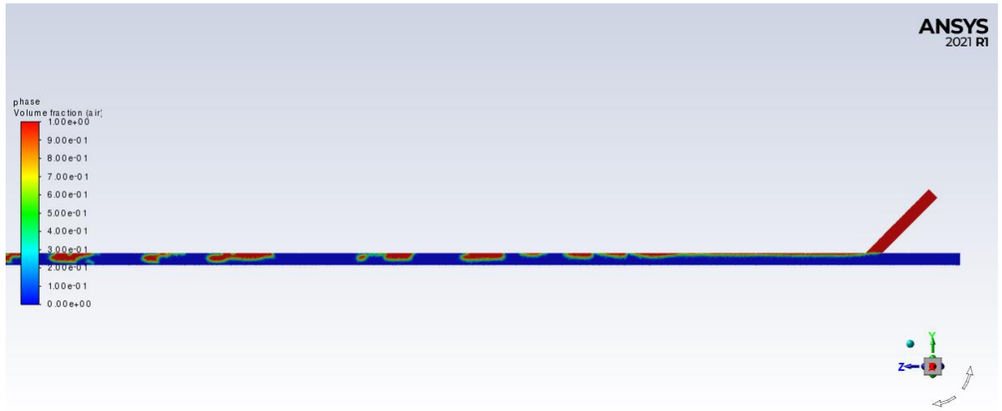


Figura 27 – Contornos da fração de volume de ar e água: Primeiro trecho horizontal Caso 1 (Var=0,75 m/s e Vh2o=2,25 m/s). Malha tetraédrica.

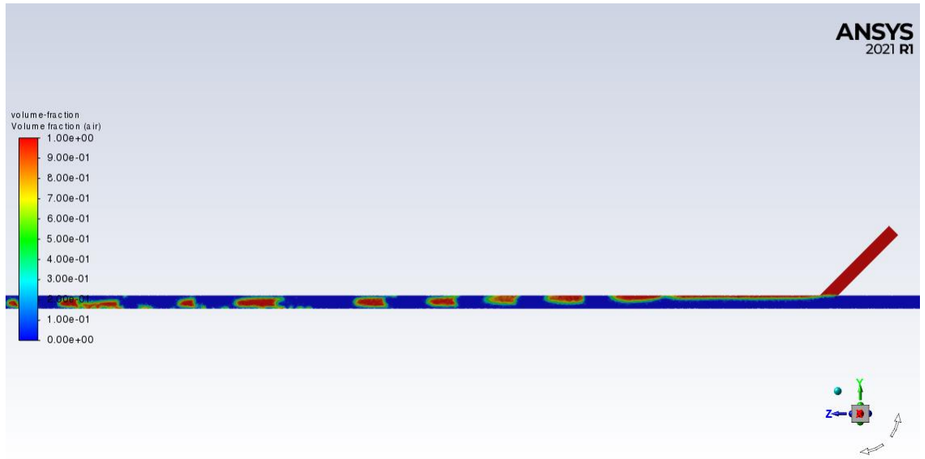


Figura 29 - Contornos da fração de volume de ar e água: Primeiro trecho horizontal Caso 3 (Var=1,25 m/s e Vh2o=3,75 m/s). Malha tetraédrica.

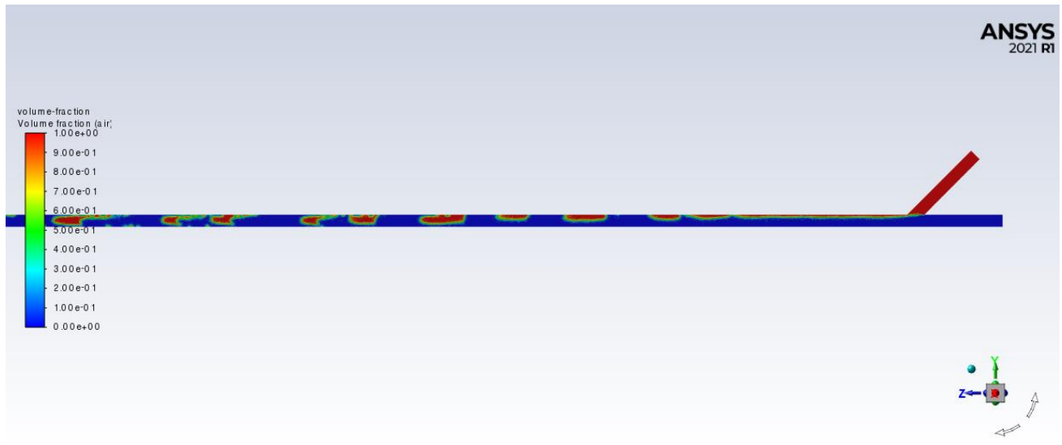


Figura 28- Contornos da fração de volume de ar e água: Primeiro trecho horizontal Caso 2 (Var=1 e Vh2o=3 m/s). Malha tetraédrica.

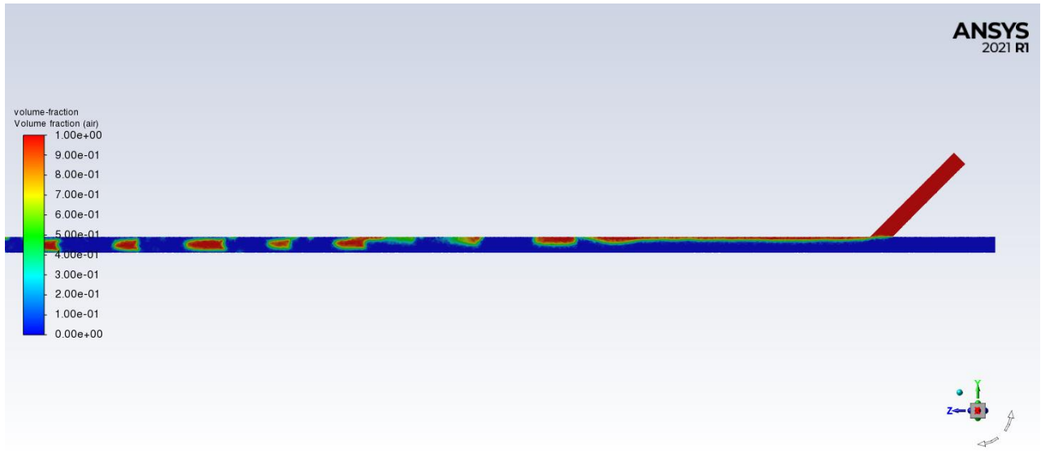


Figura 30 - Contornos da fração de volume de ar e água: Primeiro trecho horizontal Caso 4 (Var=1,5 m/s e Vh2o=4,5 m/s) . Malha tetraédrica.

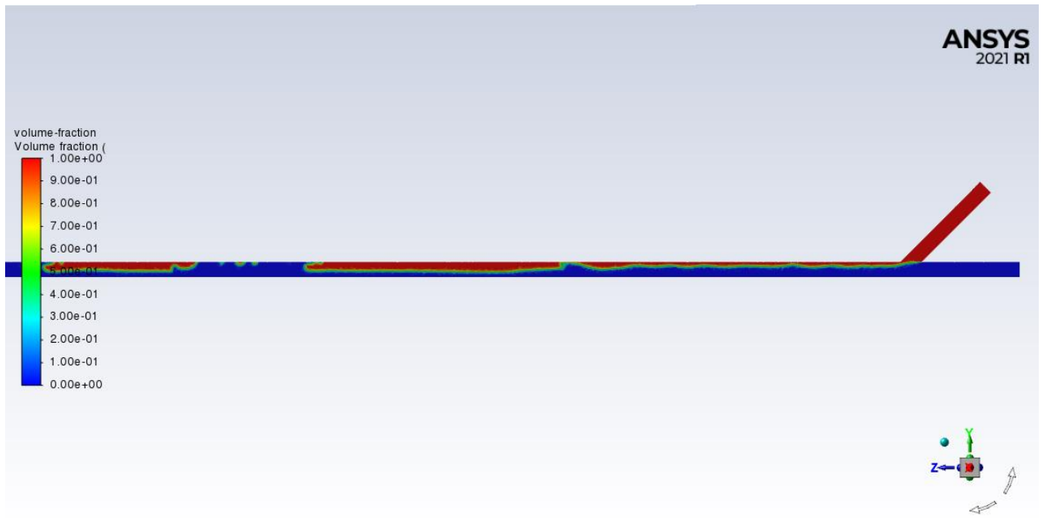


Figura 31 - Contornos da fração de volume de ar e água: Primeiro trecho horizontal Caso 5 (Var=1 m/s e Vh2o=1 m/s). Malha tetraédrica.

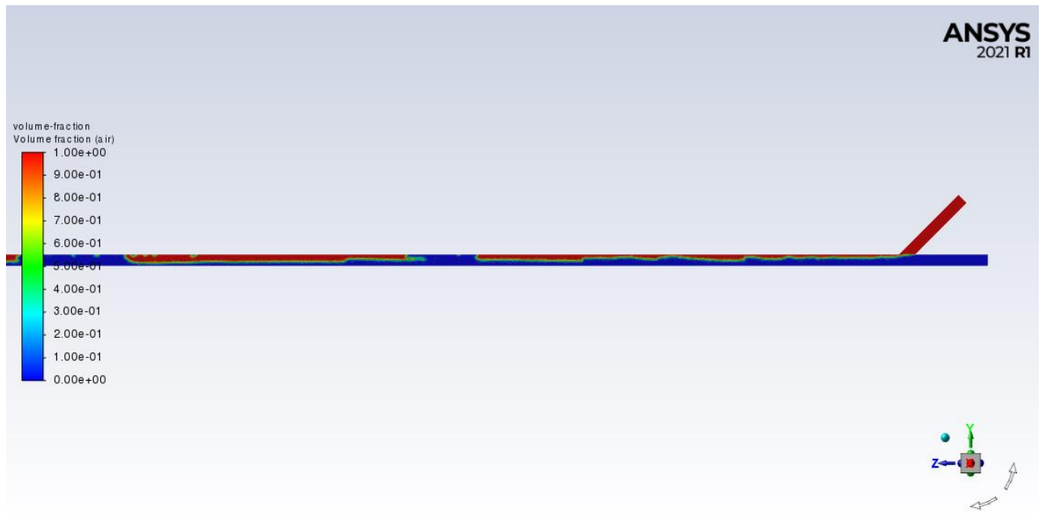


Figura 32 - Contornos da fração de volume de ar e água: Primeiro trecho horizontal Caso 6 (Var=1,5 m/s e Vh20=1,5 m/s) . Malha tetraédrica.

A seguir estão representadas as figuras da região da primeira curva:

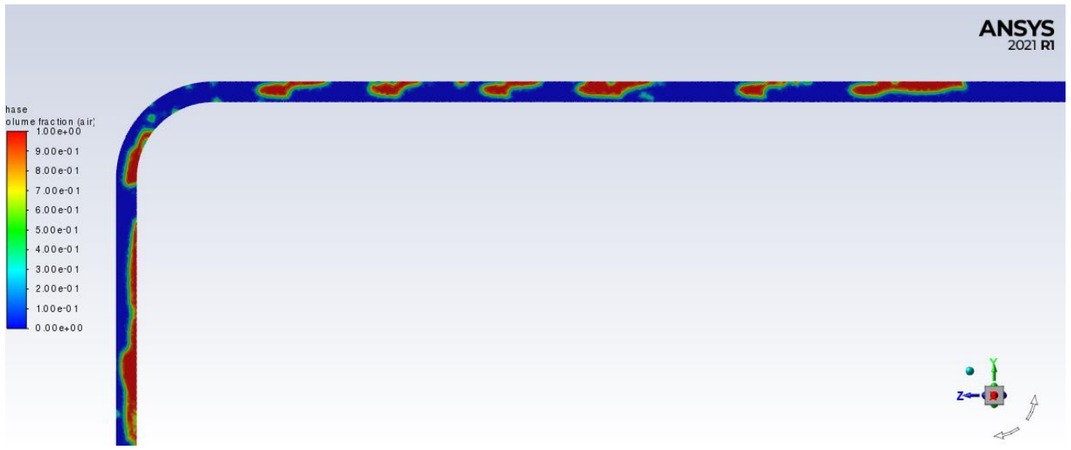


Figura 33 – Contornos da fração de volume de ar e água: Região primeira curva Caso 1 (Var=0,75 m/s e Vh2o=2,25 m/s). Malha tetraédrica.

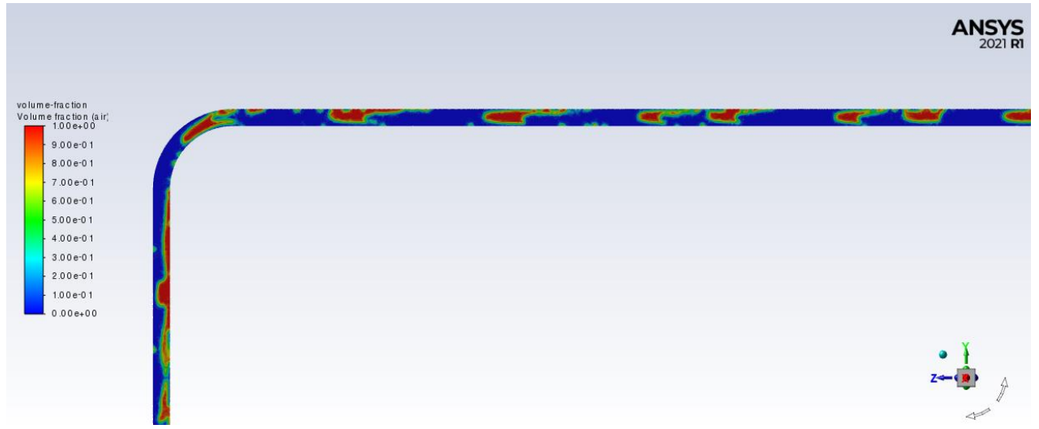


Figura 34 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região primeira curva Caso 2 (Var=1 e Vh2o=3 m/s). Malha tetraédrica.

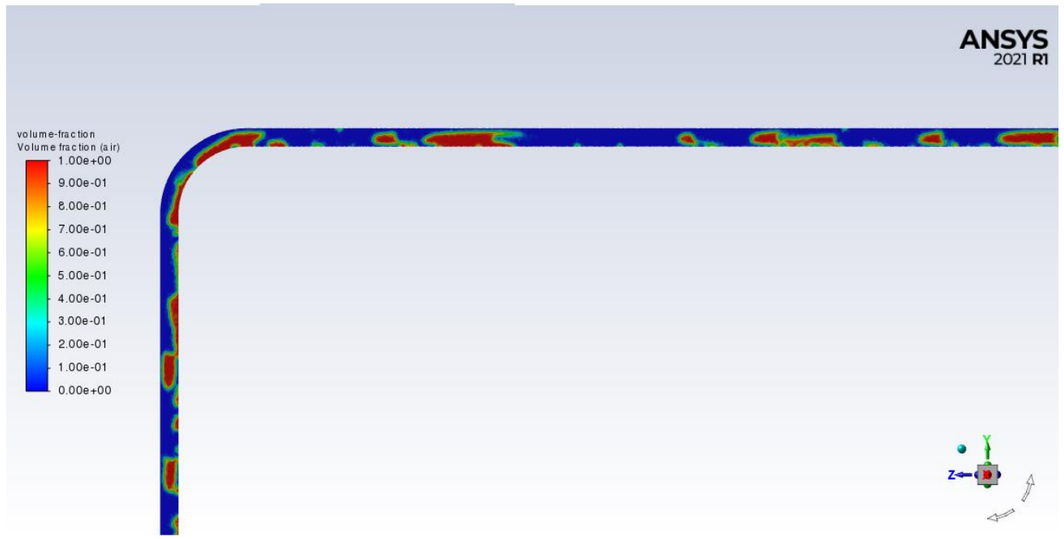


Figura 35 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região primeira curva Caso 3 (Var=1,25 m/s e Vh2o=3,75 m/s). Malha tetraédrica.

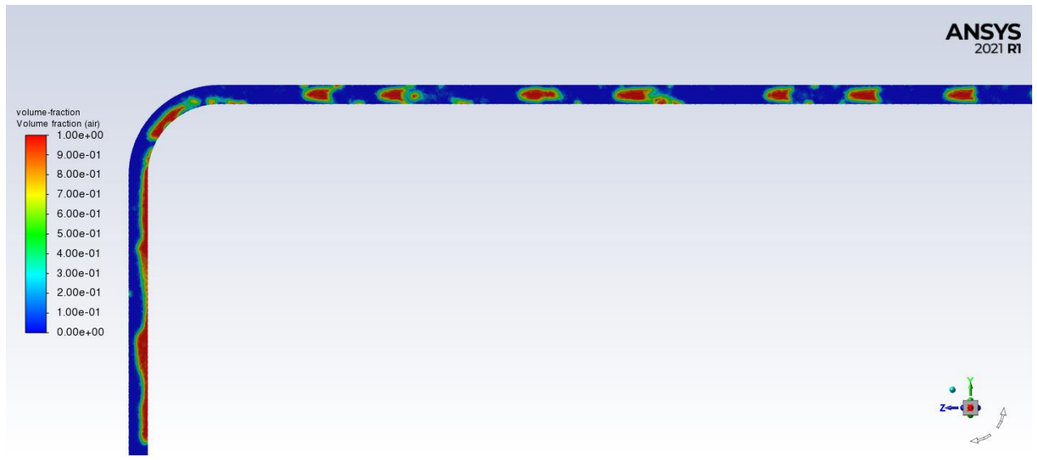


Figura 36 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região primeira curva Caso 4 (Var=1,5 m/s e Vh2o=4,5 m/s) . Malha tetraédrica.

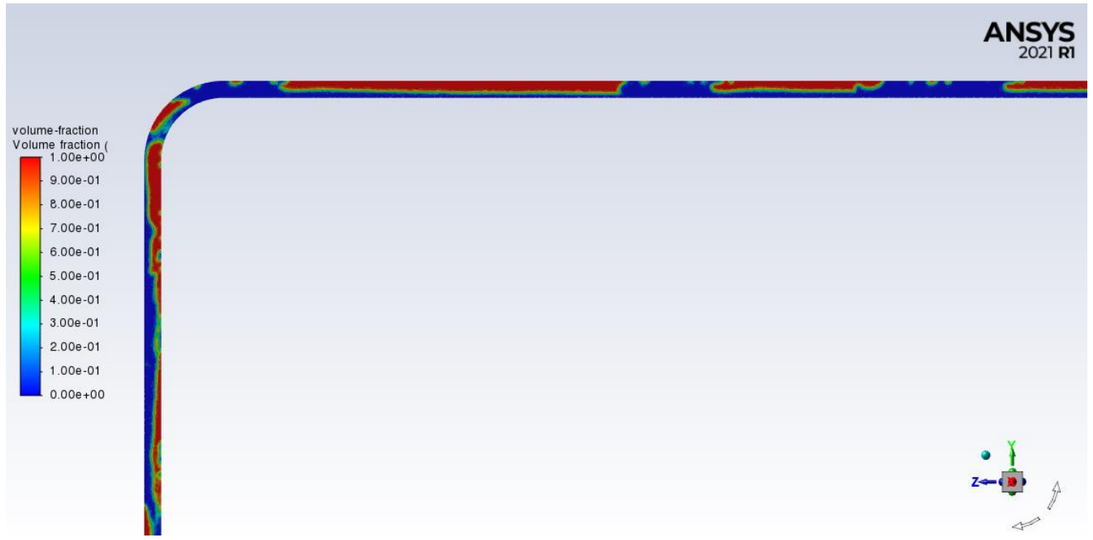


Figura 37 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região primeira curva Caso 5 (Var=1 m/s e Vh2o=1 m/s) . Malha tetraédrica.

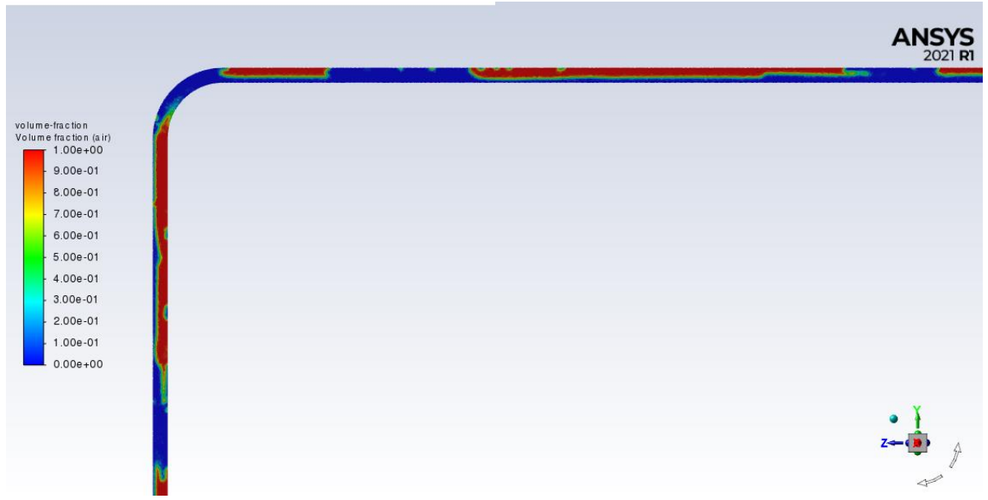


Figura 38 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região primeira curva Caso 6 (Var=1,5 m/s e Vh20=1,5 m/s) . Malha tetraédrica.

A seguir estão representadas as figuras da região da segunda curva:

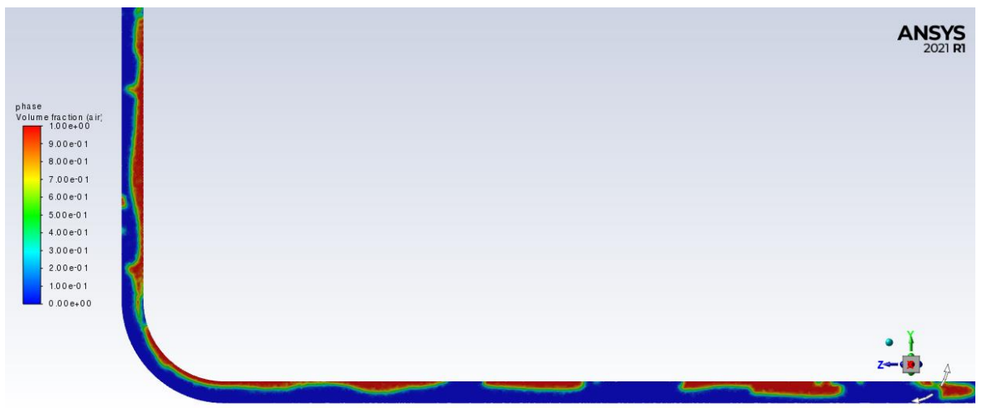


Figura 39 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região segunda curva Caso 1 (Var=0,75 m/s e Vh2o=2,25 m/s). Malha tetraédrica.

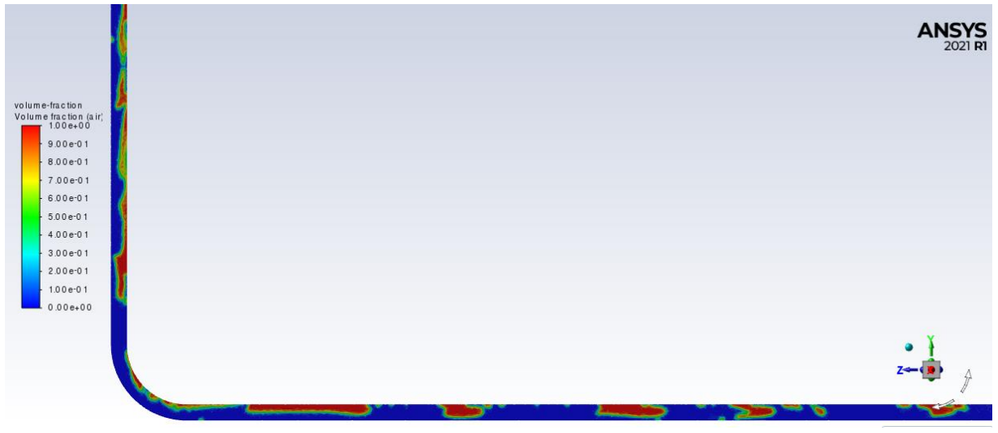


Figura 40 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região segunda curva Caso 2 (Var=1 e Vh2o=3 m/s) . Malha tetraédrica.

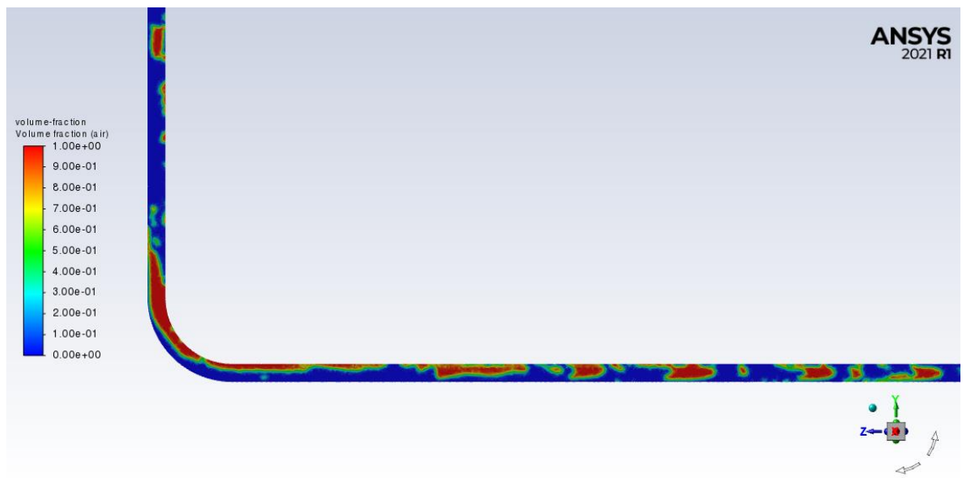


Figura 41 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região segunda curva Caso 3 (Var=1,25 m/s e Vh2o=3,75 m/s). Malha tetraédrica.

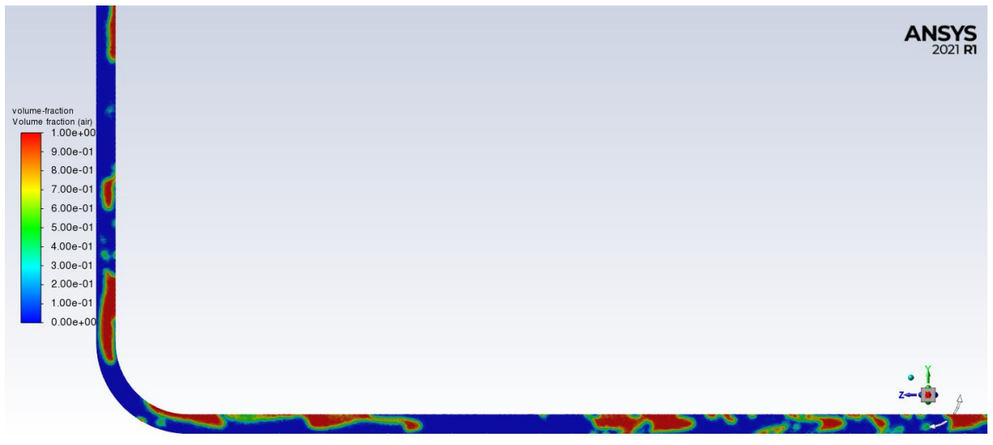


Figura 42 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região segunda curva Caso 4 (Var=1,5 m/s e Vh2o=4,5 m/s) . Malha tetraédrica.

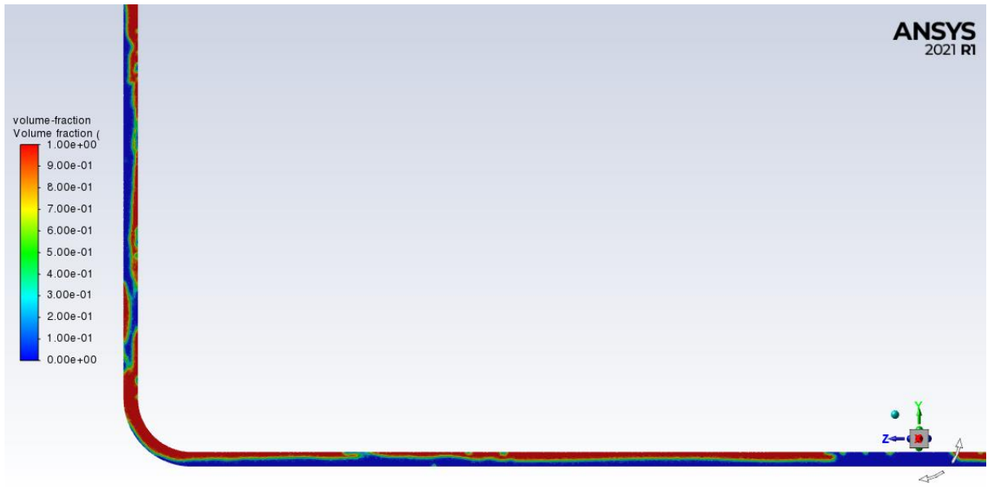


Figura 43 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região segunda curva Caso 5 (Var=1 m/s e Vh2o=1 m/s) . Malha tetraédrica.

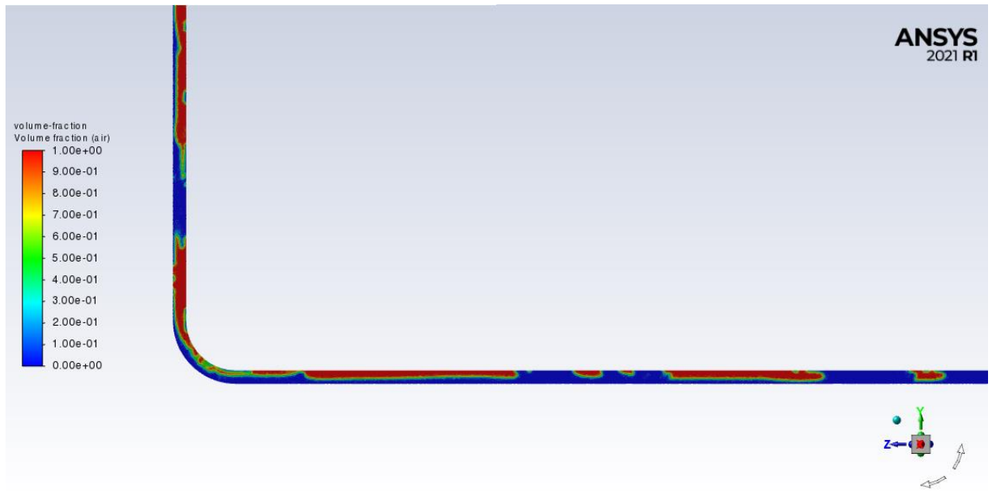


Figura 44 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região segunda curva Caso 6 (Var=1,5 m/s e Vh20=1,5 m/s) . Malha tetraédrica.

Analisando as figuras expostas dos contornos de fração de volume de ar no primeiro trecho horizontal (Figuras 27, 28, 29, 30,31 e 32), verifica-se que, em todos os casos, após a região de entroncamento dos *inlets* é formado um escoamento estratificado. Á medida que o ar percorre a tubulação, formam-se ondas instáveis originadas na interface gás-líquido, que posteriormente se desprendem, gerando bolsões de ar.

Dependendo das velocidades de injeção e, consequentemente de β, diferentes formatos de bolsões de ar são gerados. Neste sentido, para os casos 5 e 6 (β=50%), que possuem velocidades de injeção de ar e água iguais, são observados bolsões de ar mais alongados, característicos do regime de golfada. Por outro lado, analisando os casos 1, 2, 3 e 4 (β=25%), em que as velocidades de injeção de água são maiores que as de ar, são identificados bolsões de ar menores e mais dispersos, caraterísticos do regime de bolhas/bolhas alongadas.

Portanto, analisando as feições dos bolsões de ar observados nos resultados da simulação, caracteriza-se o regime de golfada para os casos 5 e 6 (β=50%) e de bolhas/bolhas alongadas para os casos 1, 2, 3 e 4 (β=25%). Tais constatações vão de encontro com os tipos de escoamento previstos com base no mapa de regime bifásico proposto por MANDHANE et al. (1974) na Figura 19.

5.1.2. Malha *Butterfly*

Conforme indicado no item anterior, a depender do β do caso, são observados dois tipos de regime de escoamento. Sendo assim, para se avaliar a influência da malha no resultado, foram selecionados os casos 1 (β=25%) e 5 (β=50%) para serem simulados com a malha *butterflly*.

Da mesma forma que para os cenários simulados na malha tetraédrica, foram feitas imagens das mesmas 3 regiões da tubulação. Importante ressaltar que todas as imagens foram feitas após 2 segundos em tempo real de simulação.

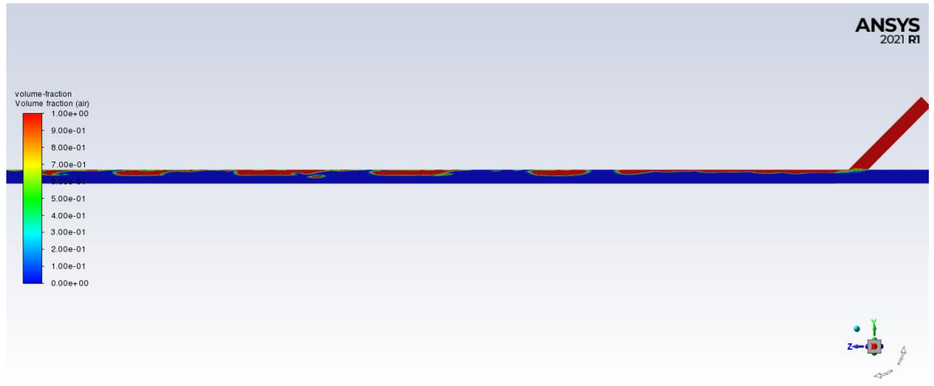


Figura 45- Contornos da fração de volume de ar e água: Primeiro trecho horizontal Caso 1 (Var=0,75 m/s e Vh2o=2,25 m/s). Malha *Butterfly*.

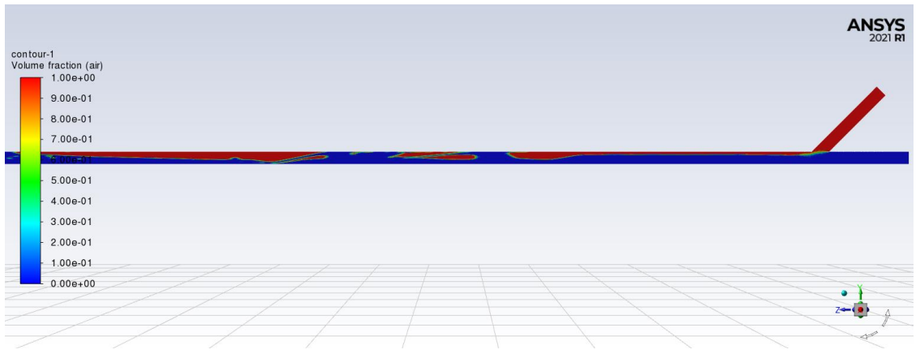


Figura 46 - Contornos da fração de volume de ar e água: Primeiro trecho horizontal Caso 5 (Var=1 m/s e Vh2o=1 m/s). Malha *Butterfly*.

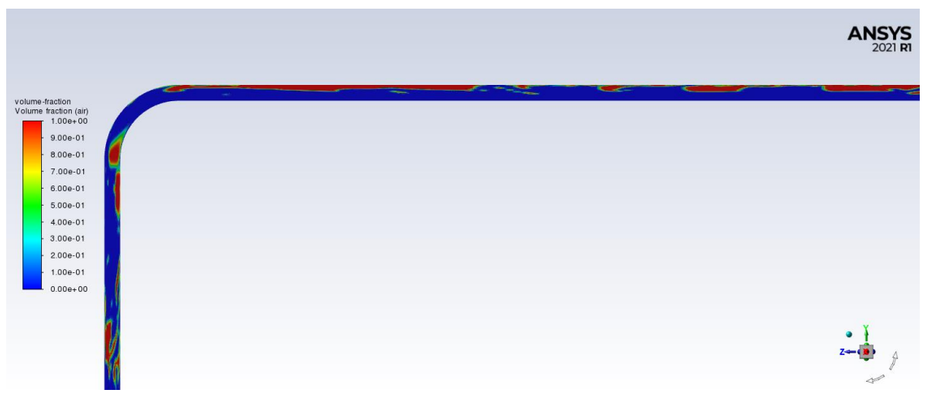


Figura 47 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região primeira curva Caso 1 (Var=0,75 m/s e Vh2o=2,25 m/s) . Malha *Butterfly*.

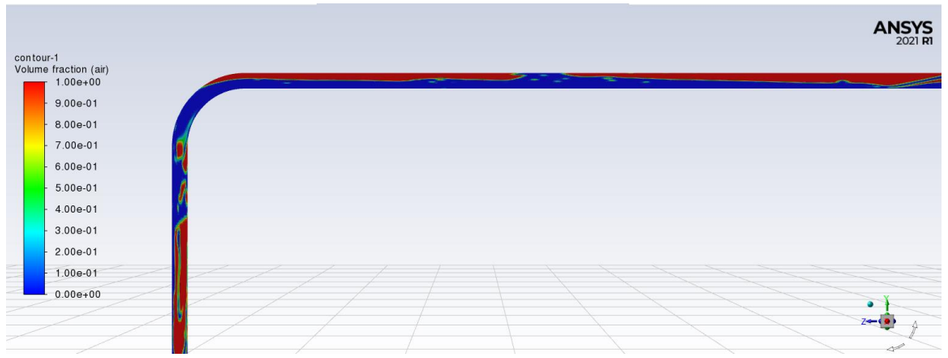


Figura 48 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região primeira curva Caso 5 (Var=1 m/s e Vh2o=1 m/s) . Malha *Butterfly*.

Figura 49 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região segunda curva Caso 1 (Var=0,75 m/s e Vh2o=2,25 m/s) . Malha *Butterfly*.

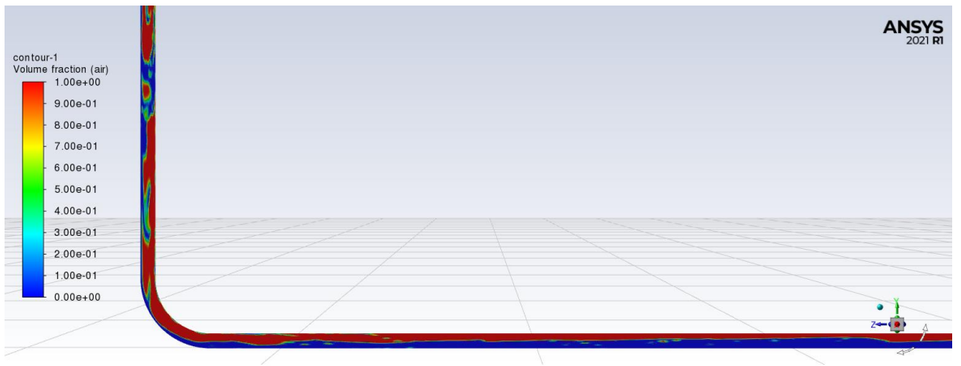


Figura 50 - Contornos da fração de volume de ar e água: Região segunda curva Caso 5 (Var= 1 m/s e Vh2o= 1 m/s) . Malha *Butterfly*.

Com a melhora na qualidade da malha, conforme esperado, é possível verificar que os contornos das frações de gás estão mais nítidos, de forma que a interface ar-água fica melhor definida, apresentando feições mais realísticas. Além disso, verifica-se que a região de transição entre o ar e água (regiões em verde) na malha *butterfly* é mais delgada.

De forma análoga aos resultados obtidos com a malha tetraédrica, verifica-se que, em todos os casos no primeiro trecho horizontal (Figuras 45 e 46), após a região de entroncamento dos *inlets* é formado um fluxo estratificado. Á medida que o ar percorre a tubulação, formam-se ondas instáveis originadas na interface gás-líquido, que posteriormente se desprendem, gerando bolsões de ar.

Adicionalmente, assim como observado nos resultados da malha tetraédrica, dependendo das velocidades de injeção, diferentes formatos de bolsões de ar são gerados. Neste sentido, para o caso 5 (β=50%), que possui velocidades de injeção de ar e água iguais, são observados bolsões de ar mais alongados. Por outro lado, analisando o caso 15 (β=25%), em que a velocidade de injeção de água é maior que a de ar, são identificados bolsões de ar menores e mais dispersos.

Portanto, novamente indo de encontro com mapa de regime bifásico proposto por MANDHANE et al. (1974), o caso 5 pode ser classificado como golfada, enquanto que o caso 1, como bolhas alongadas.

5.2. VERIFICAÇÕES, VALIDAÇÕES E DISCUSSÃO RESULTADOS

5.2.1. Resíduos

O *solver* executa soluções iterativas das equações governantes para cada intervalo de tempo. Sendo assim, a cada iteração, a soma dos erros residuais de cada uma das variáveis é calculada e armazenada, registrando o histórico. Em um computador com precisão infinita, esses resíduos atingiriam o zero, à medida que a solução convergir. Por outro lado, devido à complexidade das equações envolvidas, em um computador real o zero nunca será atingido. Para isso é definido um resíduo alvo, de modo que quando todos os resíduos monitorados caem abaixo dessa tolerância, a solução para este intervalo de tempo é tida como convergida, dando início ao cálculo de um novo intervalo de tempo. Dessa forma, o gráfico de resíduos mostra a diferença entre soluções sucessivas dessas equações, tornando-o uma das principais ferramentas para se avaliar a convergência de um modelo (ANSYS.2020).

Apesar de não haver métricas universais para julgar a convergência, de modo geral, o critério de convergência padrão no Ansys *Fluent* é 10^{-3} ; à exceção das equações de energia ,

para as quais o critério é 10^{-6} (ANSYS inc., 2020). Sendo assim, para as simulações executadas foi definido o resíduo alvo de 10^{-3}.

Um bom gráfico de resíduos apresenta um elemento-chave que é o decaimento de linhas, apresentando declives descendentes. Os resíduos devem sempre diminuir. O padrão dente de serra (*sawtooth pattern*) acontece em simulações de escoamentos transientes, de modo que cada pico representa um novo intervalo de tempo. Os picos sucessivos devem apresentar topos decrescentes ou pelo menos na mesma altura.

A seguir são apresentados os gráficos de resíduos dos Casos 1 e 5 para a malha tetraédrica e *butterfly*. Em cada um dos gráficos foram plotados os resíduos referente à equação da continuidade, termos do modelo de turbulência k-ε, e dos componentes x, y e z da velocidade.

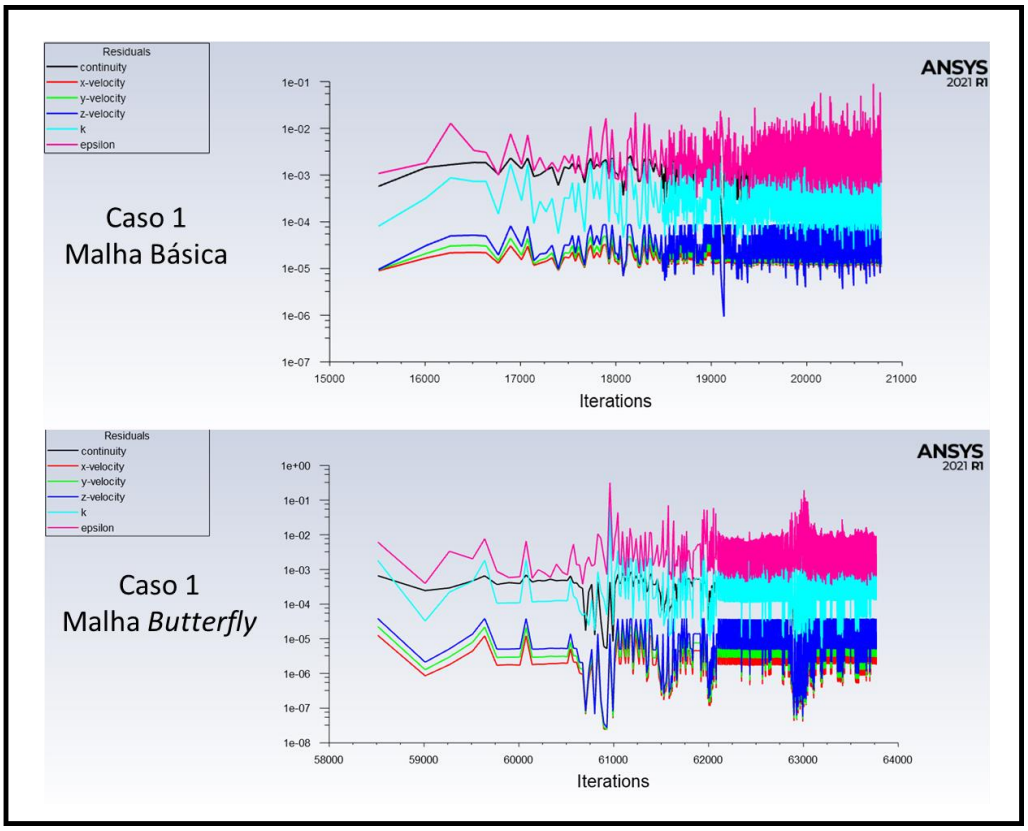


Figura 51 - Gráficos de resíduos Caso 1: Malha tetraédrica x *Butterfly*

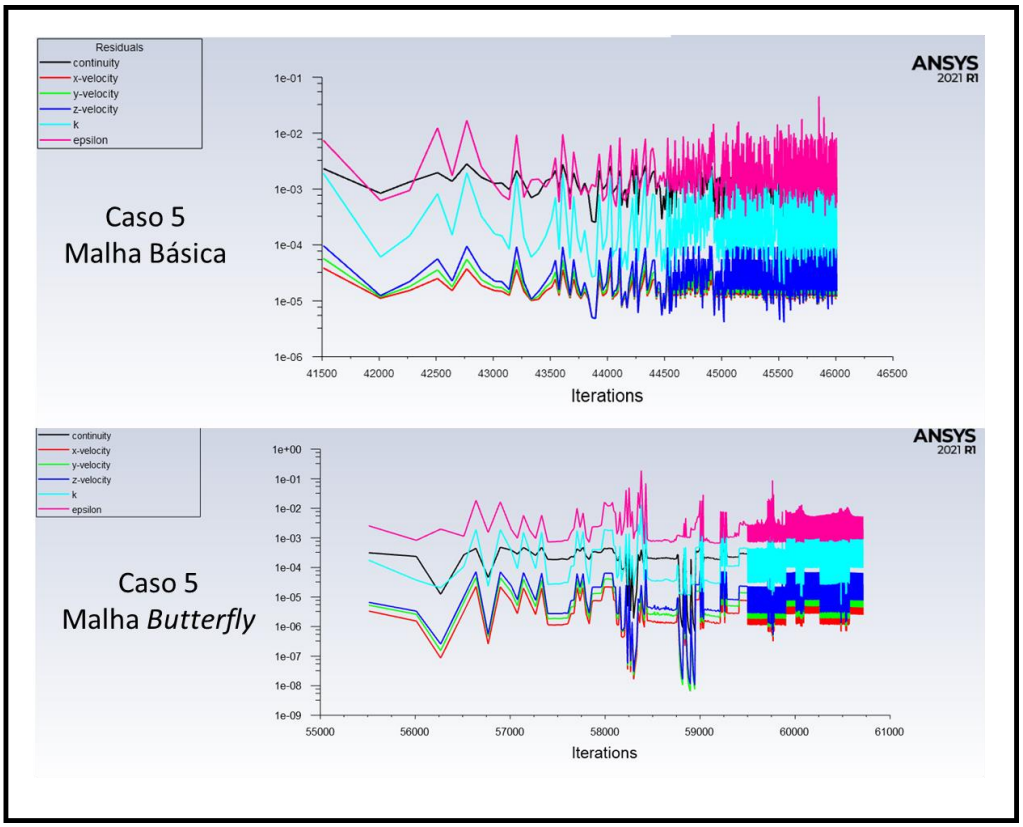


Figura 52 - Gráficos de resíduos Caso 6: Malha tetraédrica x *Butterfly*

Analisando os gráficos de resíduos, percebe-se, conforme esperado para escoamentos transientes, a existência do padrão dente de serra (*sawtooth pattern*) em todas as curvas para ambas as malhas. Neste sentido, após cada pico é verificado um decaimento dos resíduos à medida que iterações são executadas, convergindo até o valor mínimo de 10^{-3} (padrão de convergência Ansys *Fluent*), dando início à um novo *timestep* e assim sucessivamente.

É importante ressaltar que é possível que um resíduo aumente após um intervalo de tempo qualquer, porém isso não significa necessariamente que a solução esteja divergindo. É comum que os resíduos ocasionalmente aumentem, como no início de uma execução (HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR, 2010).

Dentre as curvas de resíduos plotadas, os componentes da velocidade em x, y e z são os que apresentam menores valores em todos os cenários simulados, exibindo melhor convergência. Complementarmente, quando se compara os resíduos obtidos entre as malhas para o mesmo caso de injeção, verifica-se, conforme esperado, que na malha *butterfly* são alcançados resíduos bem menores variando entre 10^{-5} e 10^{-6}, enquanto que na malha tetraédrica oscilam entre 10^{-4} e 10^{-5}.

Por outro lado, o termo épsilon do modelo de turbulência é o que oferece os maiores resíduos dentre todas as curvas analisadas. Dessa forma, este o termo é o que apresenta maior dificuldade de convergência, consumindo mais interações e funcionando como um fator limitante para se atingir o mínimo global de 10^{-3} em todos os resíduos e se iniciar um novo intervalo de tempo.

Com relação aos resíduos relativos à equação da continuidade, logo nas primeiras iterações dos intervalo de tempos iniciais são verificados fluxos reversos nas fronteiras da tubulação, provocando instabilidade no equacionamento da conservação de massa, dificultando a convergência. Para isso, especial atenção foi dada para na malha empregada nas superfícies de entrada e saída, onde foram aplicados refinamentos. Dessa forma, apesar da instabilidade verificada nos instantes iniciais, a solução rapidamente se estabiliza, se mantendo abaixo de 10^{-3}.

5.2.2. Número de iterações e capacidade de processamento.

Em uma simulação de escoamento transiente, a cada intervalo de tempo são realizadas iterações para resolver as equações governantes em todo o volume de controle para aquele intervalo de tempo. Para cada iteração, é notificado um erro, que funciona como um indicador geral da conservação das propriedades do escoamento. À medida que as iterações são executadas, os resíduos diminuem progressivamente. Deste modo, quando todos os resíduos atingem o critério de convergência preestabelecido, a solução para este intervalo de tempo é tida como convergida, dando-se início à um novo intervalo de tempo.

Neste sentido, a rapidez com que os cálculos da simulação evoluem depende também da quantidade de iterações necessárias em cada intervalo de tempo para se atingir o critério de convergência, sendo este número dependente da complexidade envolvida no problema.

Outro ponto de extrema importância para a execução dos cálculos é a capacidade de processamento utilizada. Para as simulações aqui abordadas, conforme já informado, foram utilizadas máquinas com duas configurações distintas, uma mais robusta (Intel Core i9) e outra um pouco inferior (Intel Core i5), porém ambas apresentando um ótimo desempenho, considerando os modelos disponíveis no mercado atualmente.

Neste sentido, para as simulações executadas na máquina com maior capacidade de processamento, era esperado que os cálculos fossem completados em um intervalo de tempo menor. Entretanto, comparando o tempo de cálculo demandado nas simulações dos casos 1 e 5 na malha *butterfly*, foi observado o contrário.

Tabela 3 – Tempo de processamento de casos com *time-step* empregado e máquina utilizada

	Malha tetraédrica			Malha *Butterfly*		
	Horas processamento	intervalo de tempo	Máquina	Horas processamento	intervalo de tempo	Máquina
Caso 1	25	0,0002	i5	231	0,0001	i9
Caso 2	29	0,0003	i5	Não simulado	----	----
Caso 3	41	0,0002	i9	Não simulado	----	----
Caso 4	47	0,0002	i5	Não simulado	----	----
Caso 5	59	0,0003	i9	202	0,0001	i5
Caso 6	24	0,0005	i9	Não simulado	----	----

Fonte: Elaboração própria

Apesar de que para ambos os casos as únicas diferenças sejam as velocidades de injeção de ar e água (mesma geometria, mesma malha, mesmo intervalo de tempo, mesmos modelos matemáticos, mesmas condições de convergência...), foi constatado que a máquina Intel Core i5 finalizou a simulação mais rapidamente, levando 202 horas de cálculo, enquanto Intel Core i9 levou 231 horas.

A explicação para esse maior tempo de cálculo está atrelada à velocidade média da mistura (j). O Caso 5 possui uma j igual à 2 m/s, enquanto que para o Caso 1, j é igual à 3 m/s. Por consequência a convergência dos termos referentes ao modelo de turbulência (k e *episilon*) fica mais dificultada no caso 1, fazendo com que fossem consumidas um maior número de iterações em cada intervalo de tempo. Neste sentido, ao final da simulação do Caso 1 foram necessárias mais interações do que no caso 5, conforme podemos verificar nas Figuras 51 e 52 com os nos gráficos de resíduos com a malha *butterfly*.

5.2.3. Gráficos de Pressão Dinâmica x Tempo

O escoamento contendo fases distintas, de diferentes massas específicas, acarreta na excitação das tubulações e, consequentemente, vibrações. Este fenômeno é potencializado nos locais da tubulação onde o escoamento muda de direção, como curvas e joelhos, devido ao surgimento pulsações de pressão, resultando em esforços dinâmicos na tubulação, o que pode levar a forças de agitação excessivas. Portanto, curvas em tubulações são tidas como críticas.

Neste sentido, com o objetivo de comparar as flutuações de pressão entre regimes de escoamento e entre localidades, foram inseridos dois pontos de monitoramento de pressão

dinâmica na parede da tubulação, um na região da segunda curva e outro em um trecho horizontal (malha *butterfly)*, conforme indicado nas Figuras 53 e 54 a seguir.

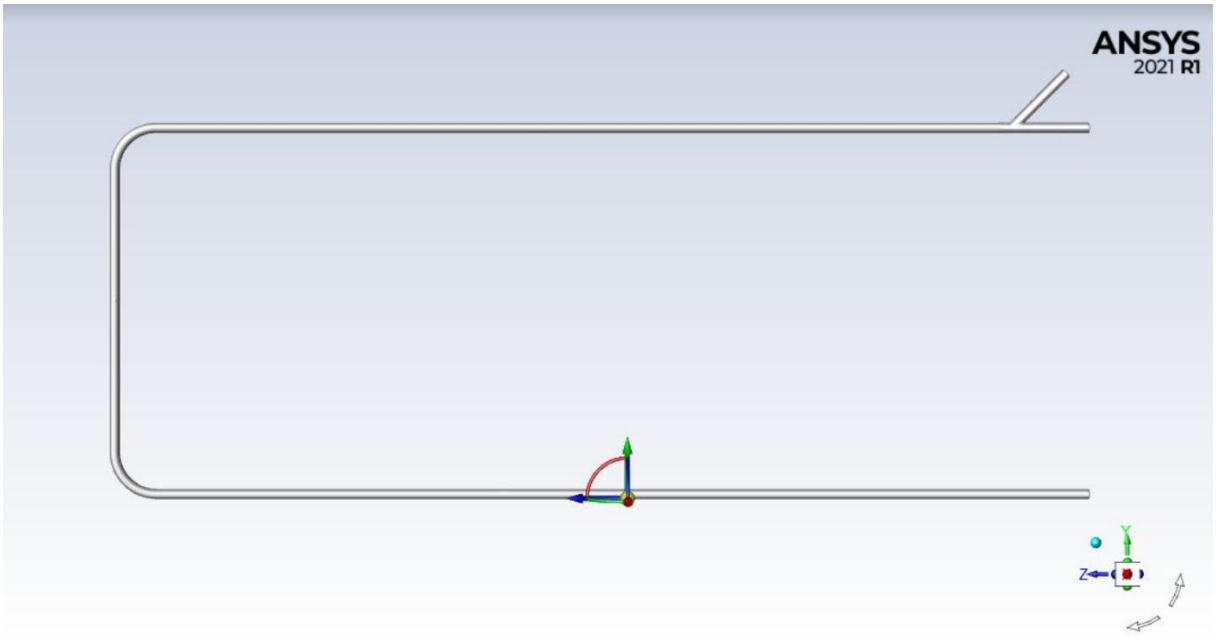


Figura 53 - Ponto de monitoramento de pressão em trecho horizontal da tubulação

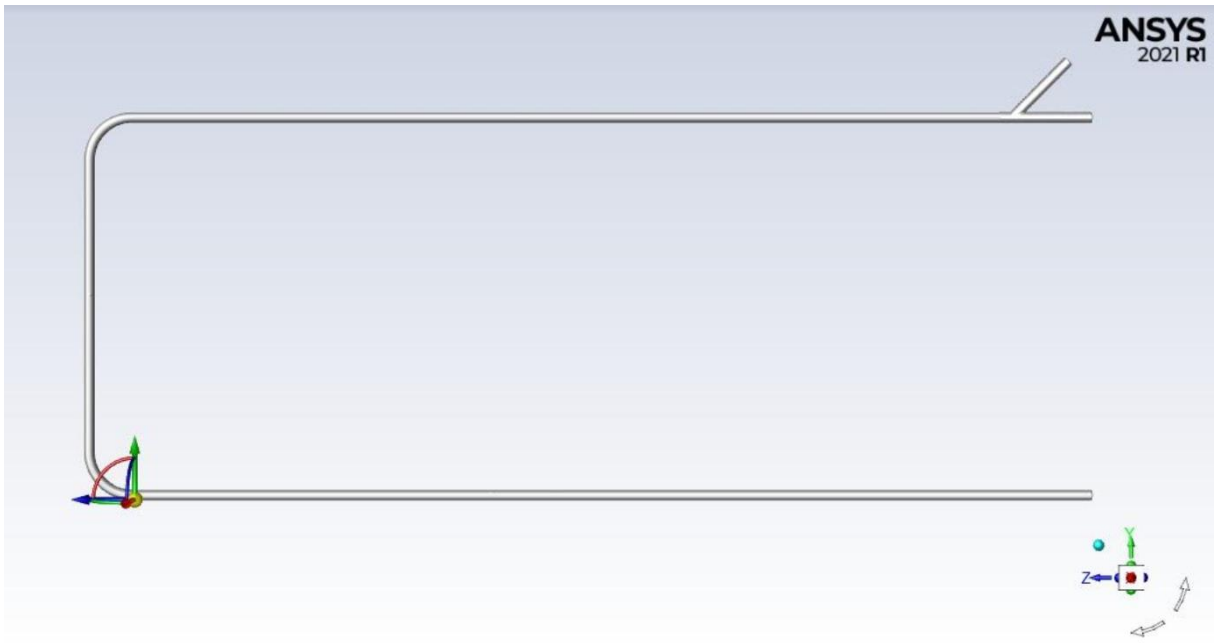


Figura 54 - Ponto de monitoramento de pressão na segunda curva da tubulação

A seguir são apresentados os gráficos de pressão dinâmica x tempo para os casos 1 e 5 em ambos os pontos de monitoramento:

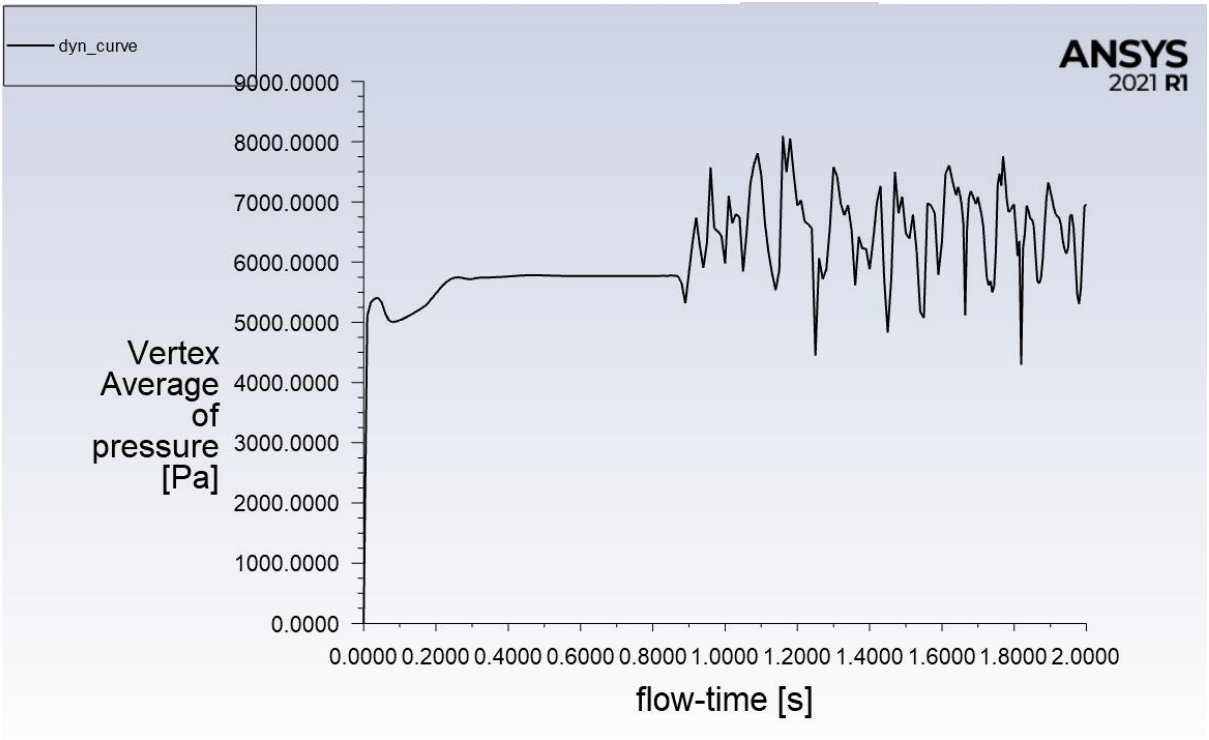


Figura 55 - Caso 1: Monitoramento pressão dinâmica ponto na curva (β=25%, regime de bolhas alongadas). Malha *butterfly*.

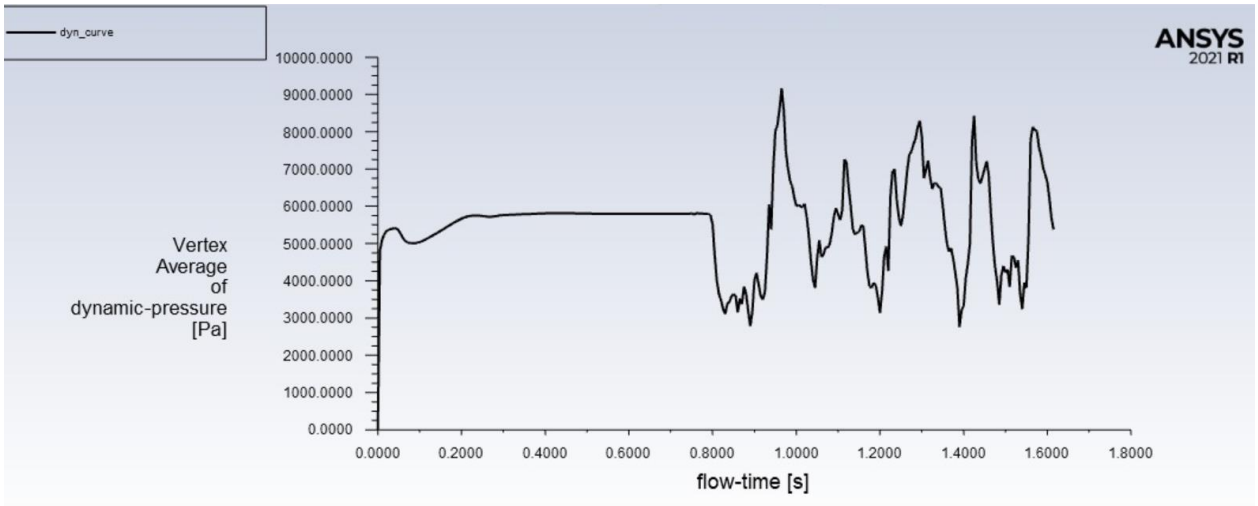


Figura 56 - Caso 5: Monitoramento pressão dinâmica ponto na curva (β=50%, regime de golfadas). Malha *butterfly*.

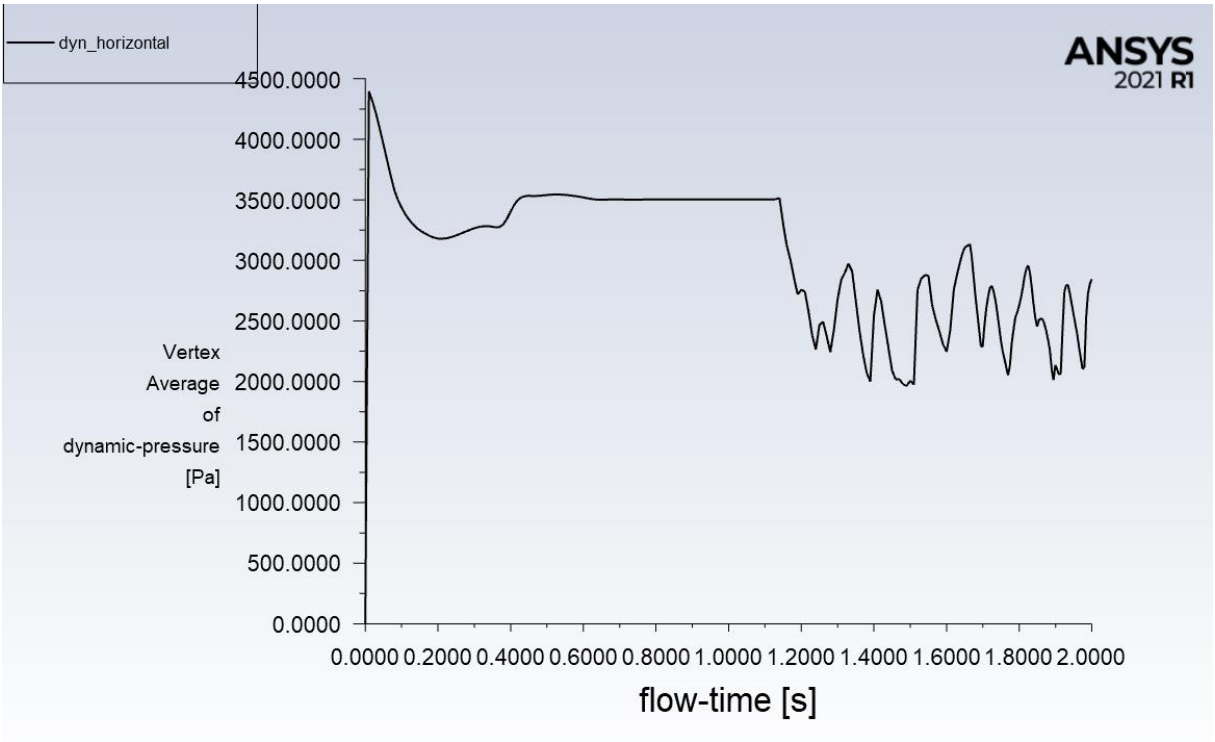


Figura 57 - Caso 1: Monitoramento pressão dinâmica ponto na horizontal (β=25%, regime de bolhas alongadas). Malha *butterfly.*

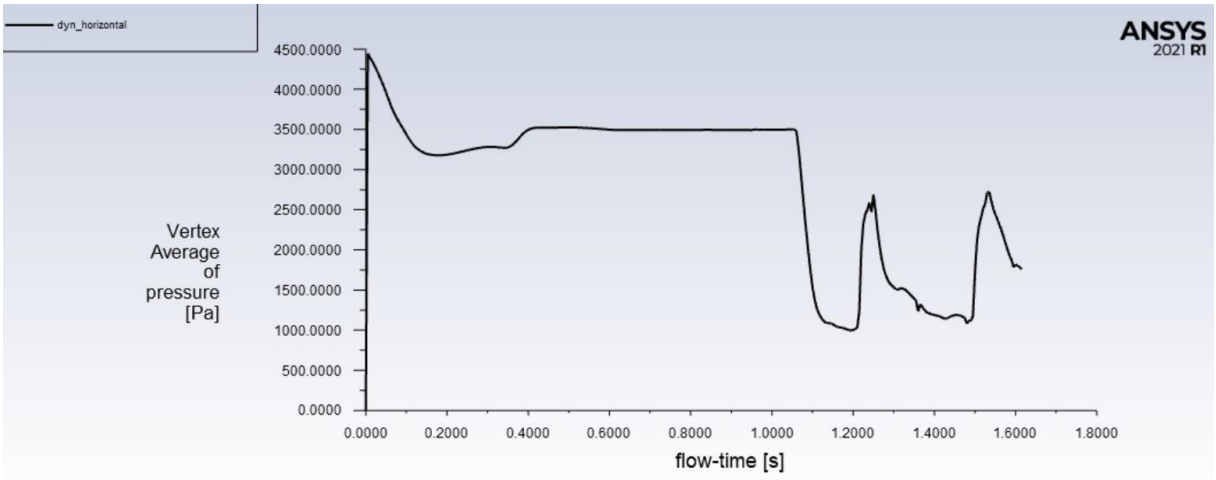


Figura 58 - Caso 5: Monitoramento pressão dinâmica ponto na horizontal (β=50%, regime de golfadas). Malha *butterfly.*

Com relação aos pontos de monitoramento na curva da tubulação, Figuras 55 e 56, analisando os gráficos obtidos de pressão dinâmica pelo tempo, verifica-se que quando no começo da simulação (tubulação inicialmente preenchida com água em repouso), a pressão dinâmica dá um salto do zero até 5375 Pa. Em seguida, é observado um pequeno decaimento até 5000 KPa, voltando novamente e subir, até atingir uma estabilidade em 5750 KPa. Esse

comportamento é notado em ambos os casos 1 e 5, estando atrelado ao período em que escoamento monofásico de água percorre a localidade analisada.

Analisando os gráficos de pressão dinâmica no ponto de monitoramento na horizontal, Figuras 57 e 58, verifica-se logo nos primeiros instantes da simulação a curva de pressão salta de zero até 4375 KPa. Posteriormente é observado um leve decaimento até 3250 KPa, voltando a subir e atingindo uma estabilidade por volta de 3500 KPa. Analogamente aos gráficos de pressão em ponto na curva, esse comportamento é notado em ambos os casos 1 e 5, estando atrelado ao período em que escoamento monofásico de água percorre a localidade analisada.

Sendo importante destacar que, conforme esperado, o patamar de estabilidade de pressão atingido durante o fluxo monofásico (tubulação inicialmente preenchida com água em repouso) é superior no ponto de monitoramento na curva.

Essa estabilidade da pressão dinâmica se mantém até o primeiro bolsão de ar chegar aos pontos de monitoramento, a partir de então, devido às diferentes densidades do fluídos ali escoando, ocorre uma variação de da quantidade de movimento, acarretando em flutuações de pressão.

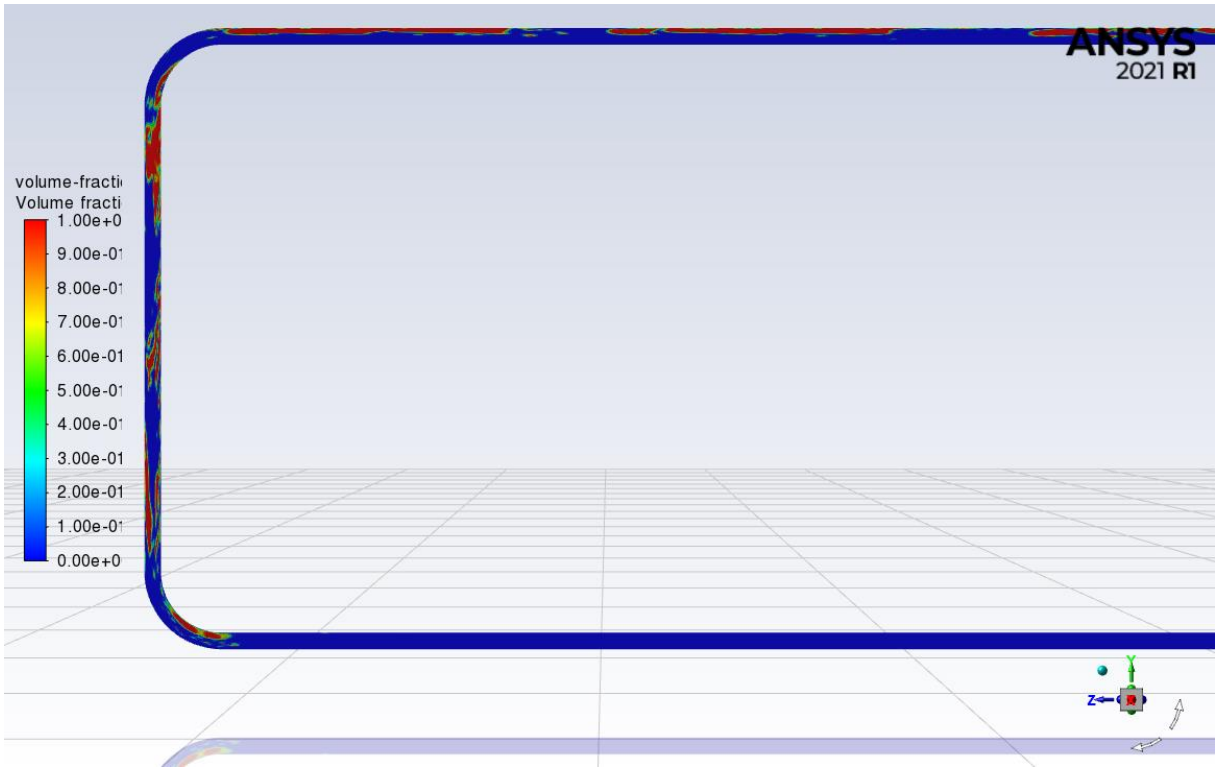


Figura 59 -Caso 1: Momento em que primeiro bolsão de ar atinge o ponto de monitoramento de pressão na curva

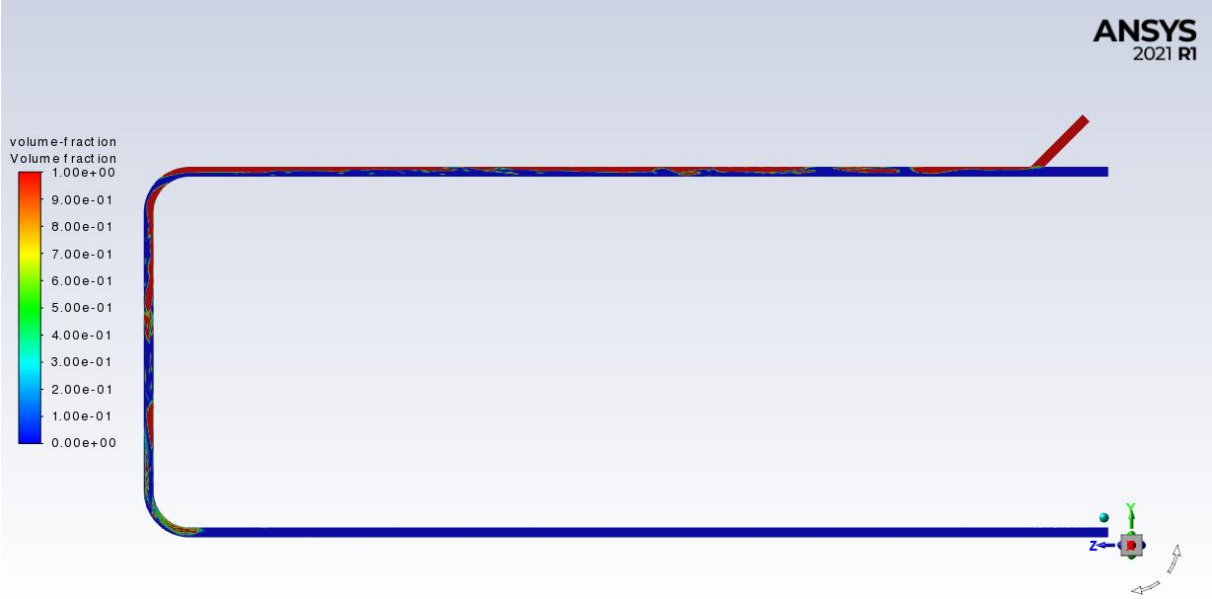


Figura 60 - Caso 1: Momento em que primeiro bolsão de ar atinge o ponto de monitoramento de pressão na curva

Pelos gráficos das Figuras 55 e 56, respectivamente, verifica-se que para o Caso 1 a primeira bolha atinge o ponto monitoramento pressão dinâmica no ponto na curva por volta de 0,9 segundos de escoamento, enquanto que no Caso 5 em 0,8 segundos. A explicação disso está na velocidade de injeção de ar, já que no caso 1 o ar é injetado à uma velocidade menor (0,75 m/s) que no caso 5 (1 m/s).

O mesmo comportamento é observado para primeira bolha que atinge o ponto monitoramento pressão dinâmica no ponto na horizontal. Neste sentido, o Caso 5 apresenta a primeira flutuação de pressão em 1,05 segundos, enquanto que o Caso 1 em 1,15. Novamente, isso é explicado pela maior velocidade de escoamento do ar no Caso 5.

É possível verificar que a intensidade da variação de pressão está atrelada ás dimensões do bolsão de ar ali percorrendo. No Caso 5, onde os bolsões de ar apresentam diâmetros maiores e mais extensos, são observadas flutuações de pressão mais acentuadas, porém com uma frequência de oscilação menor. Por outro lado, no Caso 1, que exibe bolsões de ar com menores diâmetros, menos extensos e mais dispersos, são verificadas flutuações de pressão menos acentuadas, porém com uma frequência de oscilação menor.

Comportamento semelhante pode ser observado nos dados apresentados por RAEDER (2012), mais precisamente ao se analisar os resultados experimentais das forças dinâmicas aferidas por transdutor piezoelétrico. Nas Figura 17 é possível verificar que o transdutor foi

instalado na mesma localidade do ponto de monitoramento de pressão na curva adotado nas simulações aqui apresentadas.

Nas figuras 61 e 62, a seguir, são apresentados os gráficos de sinais de força no domínio do tempo com período total 5 segundos para os casos de β igual 25% (regime de bolhas alongadas) e 50% (golfada), respectivamente.

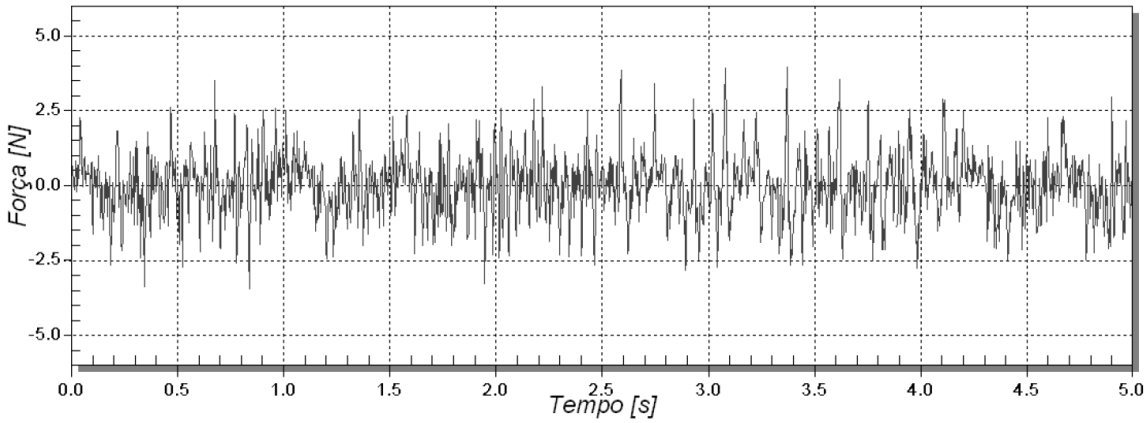


Figura 61 - Sinal no tempo da força dinâmica em escoamento por bolhas (β = 25%)
Fonte: RAEDER, 2012.

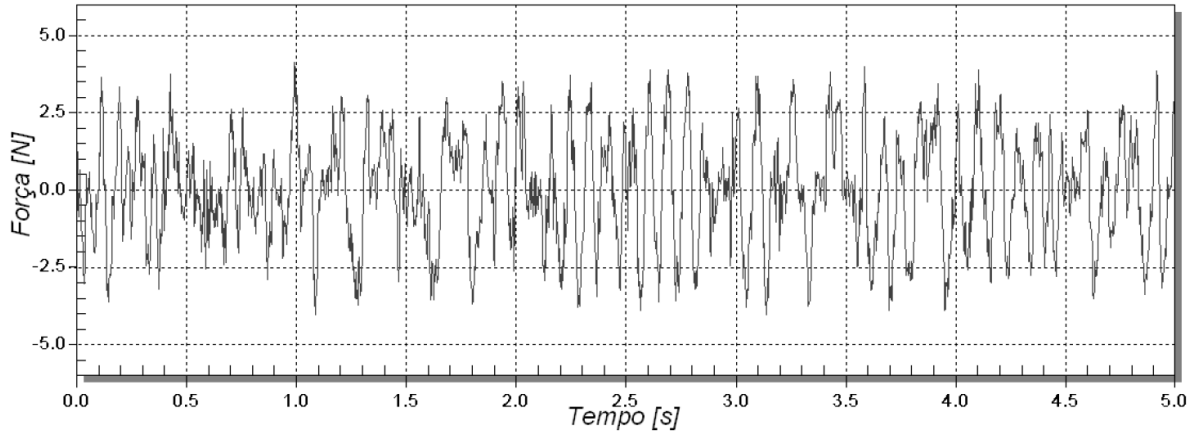


Figura 62 - Sinal no tempo da força dinâmica em escoamento por golfadas (β = 50%)
Fonte: RAEDER, 2012.

Apesar de estarmos tratando de grandezas físicas diferentes, é possível fazer uma comparação qualitativa do comportamento das flutuações de pressão em ponto na curva provenientes da simulação, com os gráficos de sinais de força no domínio do tempo coletados em testes de bancada apresentados por RAEDER (2012).

Comparando os gráficos obtidos na simulação com os provenientes de teste de bancada, é possível perceber que as flutuações seguem padrão semelhantes a depender do β do caso e, consequentemente, do regime de escoamento.

Para β igual 25 %, regime de bolhas, Figura 55 (simulação, Caso 1) e Figura 61 (teste de bancada), em ambos os casos são observadas oscilações menos acentuadas, porém com uma frequência de oscilação maior. Enquanto que Para β igual 50 %, regime de golfada, Figura 56 (simulação, Caso 5) e Figura 62 (teste de bancada), são verificadas flutuações mais acentuadas, porém com uma frequência de oscilação menor.

Portanto, além de validar os resultados da simulação com dados experimentais, foi possível verificar que, de fato, o escoamento em golfada (Caso 5, β =50 %) é mais crítico para projetos de tubulações, pois nesse regime são observadas maiores flutuações de pressão, podendo induzir a vibrações excessivas.

Adicionalmente, comparando as variações de pressão no ponto de monitoramento na curva com as de ponto localizado no trecho horizontal da tubulação, em ambos os Casos 1 e 5 (simulação), são observadas maiores flutuações na curva. Estando a explicação disso atrelada à mudança de direção no escoamento, potencializando o surgimento de pulsações de pressão.

Por fim, além das regiões próximas ás curvas experimentarem maiores flutuações de pressão, são localidades onde, por questões de montagem, é necessário a união de trechos das tubulações por meio de soldagem. Como as juntas soldadas possuem propriedades mecânicas mais sensíveis e suscetíveis à fadiga, essas regiões próximas às curvaturas são classificas como ainda mais críticas.

6. CONCLUSÃO

Falhas por fadiga induzidas por vibração em tubulações são uma grande preocupação devido aos problemas relacionados à segurança operacional, tempo de inatividade da produção, custos de ações corretivas e impactos ambientais. (ENERGY INSTITUTE, 2008)

Dentre os regimes de escoamentos bifásicos existentes, o *slug* ou golfada é classificado como mais crítico, pois são intermitentes e provocam vibrações nas tubulações (EMMERSON et al., 2015). Em caso de vibrações excessivas, podem-se decorrer falhas por fadiga nas estruturas, sendo este problema observado em um número considerável de tubulações em unidades de produção *offshore*. (AL-KHALIFA et al., 2016).

Dentre as diretrizes da *Energy Institute* (2008) para evitar falhas por fadiga induzida por vibração em tubulação de processo, existem as Técnicas Preditivas Especializadas, estando a Fluidodinâmica Computacional (CFD) entre elas.

Por conseguinte, esta Dissertação teve como objetivo desenvolver um estudo aplicando técnicas de CFD, utilizando o software *Ansys Fluent*, para simular e melhor entender a dinâmica envolvida em escoamentos bifásicos, tendo como foco o do tipo golfada.

A geometria empregada, inspirada em trabalho previamente publicado por RAEDER (2012), consiste em uma tubulação de 19,5 mm de diâmetro interno, em formato "U" na posição horizontal. Existindo duas superfícies de entrada na parte superior, uma na horizontal, onde é injetada água; e outra obliqua, onde é injetado ar. Enquanto que na parte inferior da tubulação fica a superfície de saída (*outlet*).

Primeiramente, utilizando uma malha mais tetraédrica, foram simulados seis diferentes cenários de injeção de água e ar. Como resultado, analisando imagens dos contornos de fração volumétricas das simulações, foi verificado que as feições dos bolsões de ar vão de encontro com os tipos de escoamento previstos para cada caso, considerando o mapa de regime bifásico proposto por MANDHANE et al. (1974), sendo observados os regimes de bolhas/bolhas alongadas e em golfada.

Para fins de análise de sensibilidade de malha e obtenção de maior precisão nos resultados, foi construída uma malha do tipo *butterfly*, mais adequada para o padrão de escoamento em golfadas, por oferecer uma topologia com melhor qualidade em termos de ortogonalidade, densidade e uniformidade de malha, conforme indicado por HERNANDEZ-PEREZ e ABDULKADIR (2010)

Neste sentido, foram selecionados dois casos para serem simulados na malha *butterfly*, um de bolhas alongadas (caso 1) e um de golfadas (caso 5). Como resultado, com a melhora

na qualidade da malha, foi possível verificar que os contornos dos bolsões de ar ficaram mais nítidos, de forma que a interface ar-água ficou melhor definida, apresentando feições mais realísticas.

Adicionalmente, para fins de validação numérica, analisando os gráficos de resíduos das simulações, conforme esperado para escoamentos transientes, foi constatado a existência do padrão dente de serra (*sawtooth pattern*) em todas as curvas para ambas as malhas. Sendo assim, após cada pico é verificado um decaimento dos resíduos à medida que iterações são executadas, convergindo até um valor mínimo alvo para todos as variáveis monitoradas, dando início à um novo *timestep* e assim sucessivamente. Em todos os casos, para ambas as malhas, os resíduos atingiram ao menos o critério de convergência padrão no Ansys *Fluent* de 10^{-3}. Entretanto, os resíduos observados na malha *butterfly* foram, em alguns casos, 1000 vezes menores que na malha tetraédrica.

Complementarmente, com o objetivo de comparar as flutuações de pressão entre regimes de escoamento e entre localidades na tubulação, nas simulações foram inseridos dois pontos de monitoramento de pressão dinâmica, um na região da segunda curva e outro em um trecho horizontal final.

Em ambos os pontos de monitoramento de pressão dinâmica x tempo (curva e trecho horizontal), em ambos os casos simulados, verifica-se inicialmente um breve período transiente, até se atingir um platô. Essa estabilidade de pressão dinâmica, atrelada ao período em que escoamento monofásico de água percorre a localidade analisada, se mantém até o primeiro bolsão de ar chegar aos pontos de monitoramento, quando se iniciam flutuações de pressão.

Para fins de validação contra dados experimentais, apesar de se tratar de grandezas físicas diferentes, foi feita uma comparação qualitativa do comportamento das flutuações de pressão em ponto na curva provenientes da simulação, com os gráficos de sinais de força no domínio do tempo coletados em testes de bancada apresentados por RAEDER (2012).

Comparando os gráficos obtidos na simulação com os provenientes de teste de bancada, foi verificado as flutuações seguem padrão de comportamento semelhantes, a depender do β do caso e, consequentemente, do regime de escoamento e dimensões de bolsões de ar observados.

Sendo assim, para β igual 25 %, regime de bolhas, são observadas oscilações menos acentuadas, porém com uma frequência de oscilação maior. Enquanto que para β igual 50 %, regime de golfada, são verificadas flutuações mais acentuadas, porém com uma frequência de oscilação menor.

Adicionalmente, comparando as variações de pressão no ponto de monitoramento na curva com as de ponto localizado no trecho horizontal da tubulação, em ambos os Casos 1 e 5

(simulação), são observadas maiores flutuações na curva. Estando a explicação disso atrelada à mudança de direção no escoamento, potencializando o surgimento de pulsações de pressão.

A execução das simulações aqui apresentadas só foi possível devido à infraestrutura de computadores disponíveis no Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD) da UFF, que mesmo oferecendo ótimo desempenho computacional, na malha *butterfly* chegou a levar quase dez dias para rodar determinadas simulações.

Entretanto, para trabalhos futuros, com a disponibilização e acesso à uma compacidade de processamento superior, será possível aperfeiçoar o modelo a ser simulado, se aproximando ainda mais das condições de operação em tubulações industriais. Neste sentido, maneiras de se aprimorar este estudo seria aumentar diâmetro da tubulação, utilizando dimensões realísticas com as utilizadas em campo; aumentar tempo de simulação, podendo ter acesso à dados com um espaço amostral mais extenso; executar simulações considerando escoamento multifásico, conforme observado em campo, considerando água, óleo e gás; executar estudos de análise fluido-estrutura.

7. BIBLIOGRAFIA

ABDULKADIR, M. *et al*. Comparison of experimental and Computational Fluid Dynamics (CFD) studies of slug flow in a vertical riser. Experimental Thermal and Fluid Science, E.U.A., v. 68, p. 468-483, 2015.

ABDULKAREEM, L. *et al.* Comparison of different tools to study gas-liquid flow. ExHFT-7, Krakow, Polonia., 28 junho – 03 Julho, 2009.

AL-KHALIFA, Hussain; OSHINOWO, Lanre; ALS-SAIF, Omar. Transient Multiphase Simulation in Separator Vessel Internals Design in Saudi Aramco. ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Phoenix, E.U.A., v.07, p. 11–17, novembro, 2016.

ANSYS INC. Ansys *Fluent* Theory Guide. Canonsburg, E.U.A., 2020

BEISER, Arthur. Applied Physics. McGraw–Hill, Nova York, E.U.A., 2004.

BHASKARAN, R.; COLLINS, L. Introduction to CFD Basics. Notas de Aula MAE 5230. Cornell University, E.U.A., 2019

BRONSON, Richard, COSTA, Gabriel. Schaum's Outline of Differential Equations. McGraw–Hill, Nova York, E.U.A., 2006.

BUCHANAN, George. Finite Element Analysis: Schaum's outline of theory and problems. McGraw–Hill, Nova York, E.U.A., 1995

CAETANO, E. F.; SHOHAM, O.; BRILL, J. P. Upward Vertical Two-Phase Flow through an Annulus—Part II: Modeling Bubble, Slug, and Annular Flow. ASME Journal of Energy Resources Technology, E.U.A., v. 114(1), p. 14–30, março 1992.

CALLISTER, William. Materials Science and Engineering. John Wiley & Sons, U.S.A., 2018.

CORNELIUSSEN, Sidsel *et al*. Handbook of Multiphase Flow Metering. Norwegian Society for Oil and Gas Measurement e The Norwegian Society of Chartered Technical and Scientific Professionals, Oslo, Noruega, 2005.

DET NORSKE VERITAS. DNV-RP-C203 Fatigue Design of *Offshore* Steel Structures, 2011.

DUKLER, Abraham; HUBBARD, Martin. A Model for Gas-Liquid Slug Flow in Horizontal and Near Horizontal Tubes. Industrial & Engineering Chemistry Research, Houston, E.U.A., v. 14, p. 337–347, novembro 1975.

DUNS, H; ROS, N. C. J. Vertical Flow of Gas and Liquid Mixtures in Wells. 6th World Petroleum Congress, Frankfurt, Alemanha, junho 1963.

ECONOMIDES, Michel. Reservoir stimulation. Wiley, Chichester, Inglaterra, 2000.

EMMERSON, P.; LEWIS, M.; BARTON, N. Improving Boundary Conditions for Multiphase CFD Predictions of Slug Flow Induced Forces. 17th International Conference on Multiphase Production Technology, Cannes, França, junho 2015.

ENERGY INSTITUTE. Guidelines for the Avoidance of Vibration Induced Fatigue Failure in Process Pipework. Londres, 2008.

FLETCHER, Clive. Computational Techniques for Fluid Dynamics. Springer, Berlin, Alemanha, 1998.

HASAN, A. R.; KABIR, C. S. Performance of a Two-Phase Gas/Liquid Flow Model in Vertical Wells. Elsevier Journal of Petroleum Science and Engineering, Amsterdã, Holanda, v. 4, p. 273-289, julho 1990.

HERNANDEZ-PEREZ, V. Gas-liquid two-phase flow in inclined pipes. Nottingham Reino Unido, 2008. Tese PhD - School of Chemical, Environmental and Mining Engineering, University of Nottingham, 2008.

HERNANDEZ-PEREZ, V.; ABDULKADIR, M.; AZZOPARDI, B. J. Grid Generation Issues in the CFD Modelling of Two-Phase Flow in a Pipe. Journal of Computational Multiphase Flows, v. 3, p. 13-26, março 2010.

HOHNE, Thomas; DIRK, Lucas. Numerical simulations of counter-current two-phase flow experiments in a PWR hot leg model using an interfacial area density model. Elsevier International Journal of Heat and Fluid Flow, v. 32, p.1047-1056, outubro 2011.

IBARRA, R.; MOHAN, R. S.; SHOHAN, O. Investigation of Critical Sand-Deposition Velocity in Horizontal Gas/Liquid Stratified Flow. SPE Production & Operations, Louisiana, E.U.A., v. 32, p. 218-227, julho 2016.

JAMIESON, A.W. High performance multiphase metering: A personal perspective. Measurement and Control, Noruega, v. 33, p. 73-77, abril 2000.

KORDYBANK, E. S. A model for Two-Phase Slug Flow in Horizontal Tubes. ASME Journal of Basic Engineering, v. 83, p. 613–618, dezembro 1961.

KORDYBANK, Eugene. Some Details of Developing Slugs in Horizontal Two-Phase Flow. AIChE Journal, v 31, pp 802-806, maio 1985.

LEFRANÇOIS, Emmanuel; BOUFFET, Jean-Paul. An Introduction to Fluid-Structure Interaction: Application to the Piston Problem. Society for Industrial and Applied Mathematics, v. 52, p. 747-767, 2010

MANDHANE, J. M., GREGORY, G. A., AZIZ, K. A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 1, pp. 537, 1974.

MAHMUD, Hisham. Multiphase Transient Flow in Pipes. Curtin, Australia, 2012. Tese PhD - Department of Chemical Engineering, Curtin University, Australia, 2012.

MENTER, F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. AIAA journal, v. 32, p. 1598-1605, 1994.

MIWA, Shuichiro; HIBIKI, Takashi. State-of-the-art in plant component flow-induced vibration (FIV). Experimental and Computational Multiphase Flow, China, v. 02, p. 1-12, agosto 2020.

MOREIRA, R.; GAMA, A. Estudo da vibração em tubulações metálicas e de fibra de vidro. Relatório Técnico Petrobras. Universidade Federal Fluminense, 2007.

MUKHERJEE, H.; BRILL, J. P. Pressure Drop Correlations for Inclined Two-phase Flow. Journal of Energy Resources Technology, v. 107, p. 549-554, dezembro 1985.

ORKISZEWSKI, J. Predicting Two-Phase Pressure Drops in Vertical Pipe. Journal of Petroleum Technology, v. 19, p. 829–838, juho 1967.

PARSI, Mazdak at al. CFD simulation of sand particle erosion in gas-dominant multiphase flow. Elsevier Journal of Natural Gas Science and Engineering, v. 27, p. 706-718, dezembro 2015.

RAEDER, T. Estudo experimental de esforços dinâmicos em tubulações com escoamento bifásico. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Fluminense, 2012.

REHM, Bill at al. Managed Pressure Drilling. Gulf Publishing Company, 2009.

SALEHI, Saeed *et al*. Research and Development on Critical (Sonic) Flow of Multiphase Fluids through Wellbores in Support of Worst-Case-Discharge Analysis for *Offshore* Wells. The University of Oklahoma, E.U.A, 2018.

SCHIJVE, Jaap. Fatigue of Structures and Materials. Springer, 2019.

SOO, L. Multiphase Fluid Dynamics. Science Press, Beijing, 1995

STUCKENBRUCK, S. Escoamento Multifásico. Notas de aula MEC2346. Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2020.

TAITEL, Y.; BARNEA, D. DUKLER, A. E. Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. AIChE Journal, V. 67, 1980.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Research Studies Pr Ltd, Inglaterra. 1995.

VILLELA, M. Análise do comportamento da temperatura em sistemas de produção de petróleo: comparação entre completação seca e molhada. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.

ZUBER, N.; FINDLAY, J. Average volumetric concentration in two-phase flow systems. Journal of Heat Transfer, v. 87, p. 453-468, novembro 1965.