



Tipo de artigo: Artigo original

## Aplicação da técnica de fluidodinâmica computacional a escoamentos do tipo golfada em tubulações industriais

Luiz Filipe Ribeiro<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7023-3294>

Roger Matsumoto Moreira<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6205-1071>

<sup>a</sup> Universidade Federal Fluminense - UFF, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Montagem Industrial, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil

**Resumo:** Falhas por fadiga em tubulações, induzidas por vibrações, são preocupantes devido a impactos na segurança, custos e tempo de inatividade. O escoamento bifásico de golfada é especialmente crítico, pois provoca vibrações que podem causar falhas. A *Energy Institute* (2008) recomenda técnicas preditivas, como a Fluidodinâmica Computacional (CFD), para prevenir essas falhas. Sendo assim, este Artigo utiliza CFD com o *software Ansys Fluent* para simular escoamentos de golfada em uma tubulação "U" de 19,5 mm de diâmetro, inspirada em testes de bancada. Foram simulados seis cenários com duas malhas diferentes: tetraédrica (menos refinada) e *butterfly* (mais precisa). Inicialmente, a malha tetraédrica mostrou conformidade com os regimes de escoamento previstos na literatura. Para análises mais precisas, dois casos foram simulados na malha *butterfly*, resultando em contornos de bolsões de ar mais nítidos e interfaces ar-água mais realísticas. Conforme esperado para escoamentos transientes, as simulações revelaram o padrão de dente de serra nos gráficos de resíduos, com resíduos convergindo aos critérios mínimos aceitáveis. Pontos de monitoramento de pressão dinâmica revelaram flutuações de pressão quando bolsões de ar chegaram aos pontos de monitoramento, com maiores flutuações observadas na curva da tubulação devido à mudança de direção do escoamento. Além disso, essas flutuações de pressão foram consistentes com os dados de Raeder (2012), variando conforme a fração de vazio e o regime de escoamento.

**Palavras-chave:** tubulações industriais, vibrações, escoamento golfada, fluidodinâmica computacional (CFD).

**Abstract:** Fatigue failures in pipelines induced by vibrations are concerning due to impacts on safety, costs, and downtime. The slug flow regime is particularly critical as it causes vibrations that can lead to failures. The Energy Institute (2008) recommends predictive techniques, such as Computational Fluid Dynamics (CFD), to prevent these failures. This article uses CFD with Ansys Fluent software to simulate slug flows in a 19.5 mm diameter "U" shaped pipeline inspired by bench tests. Six scenarios were simulated with two different meshes: tetrahedral (less refined) and butterfly (more precise). Initially, the tetrahedral mesh showed conformity with the flow regimes predicted in the literature. For more accurate analyses, two cases were simulated using the butterfly mesh, resulting in clearer contours of air pockets and more realistic air-water interfaces. As expected for transient flows, the simulations revealed a sawtooth pattern in the residual graphs, with residuals converging to acceptable minimum criteria. Dynamic pressure monitoring points revealed pressure fluctuations when air pockets reached the monitoring points, with more significant fluctuations observed in the pipeline curve due to changes in the flow direction. These pressure fluctuations were consistent with Raeder (2012) data, varying according to void fraction and flow regime.

**Keywords:** industrial piping: vibration: slug flow: computational fluid dynamics (CFD).

**Como citar:** RIBEIRO, L., MOREIRA, R. **Aplicação da Técnica de Fluidodinâmica Computacional a Escoamentos do Tipo Golfada em Tubulações Industriais.** *Engevista*, vol. 22, n.1, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2024.

**Autor para contato:** Luiz Ribeiro. E-mail: [luizfiliperibeiro@id.uff.br](mailto:luizfiliperibeiro@id.uff.br)

**Financiamento:** 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 e custeando a aquisição de computadores para o LabCFD e licenças do software ANSYS Fluent.

**Conflito de interesse:** Nada a declarar.

## 1 INTRODUÇÃO

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 industriais (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, objetiva-se apresentar 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.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Para seleção de qual geometria ser utilizada e os cenários 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.

Para isso, foi utilizado uma tubulação de 19,5 mm de diâmetro interno, conduzindo misturas de água e ar em diferentes combinações de fração volumétrica e de velocidade de escoamento. 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 oblíqua, onde é injetado ar. Além de uma superfície de saída, conforme ilustrado na Figura 1:

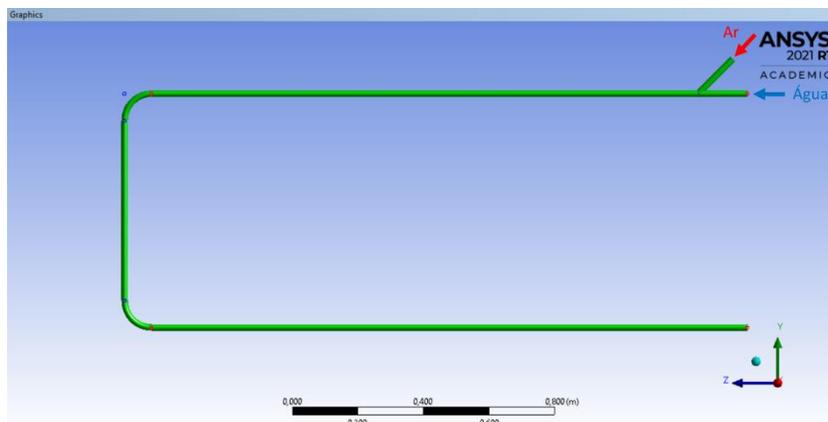


Figura 1- Geometria da tubulação analisada

Fonte: o autor.

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. Abaixo na Figura 2 é possível verificar quais seriam os regimes bifásico horizontal para os seis cenários simulados.

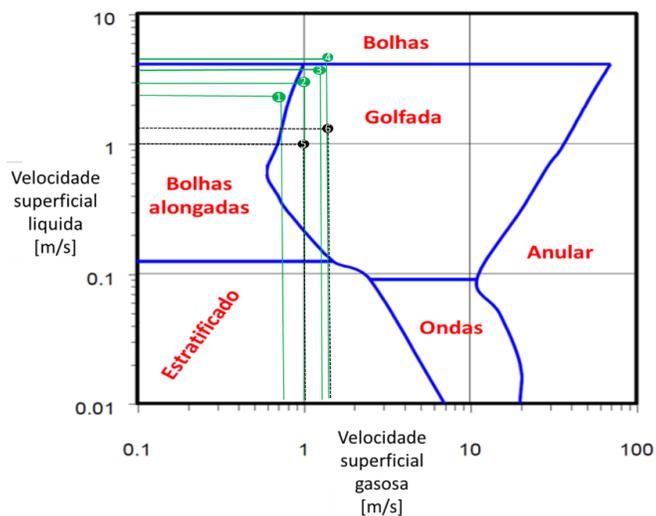


Figura 2 - Mapa de Escoamento com pontos alvo da simulação no mapa do regime bifásico horizontal.

Fonte: Adaptado de Mandhane et al., 1974.

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.

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

Para a configuração do modelo, o domínio computacional foi inicialmente preenchido com água em repouso. Foi adotado o modelo *Volume of Fluid* (VOF), por ser o mais adequado para se reproduzir o escoamento *slug*. Adicionalmente, para se contabilizar os efeitos da turbulência, foi adotado o modelo *realizable* do  $k-\epsilon$ .

### **3 MALHAS**

#### **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 as superfícies de entrada e saída, onde foram aplicados refinamentos.

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. Na Figura 3 são apresentadas imagens da malha tetraédrica empregada na simulação.

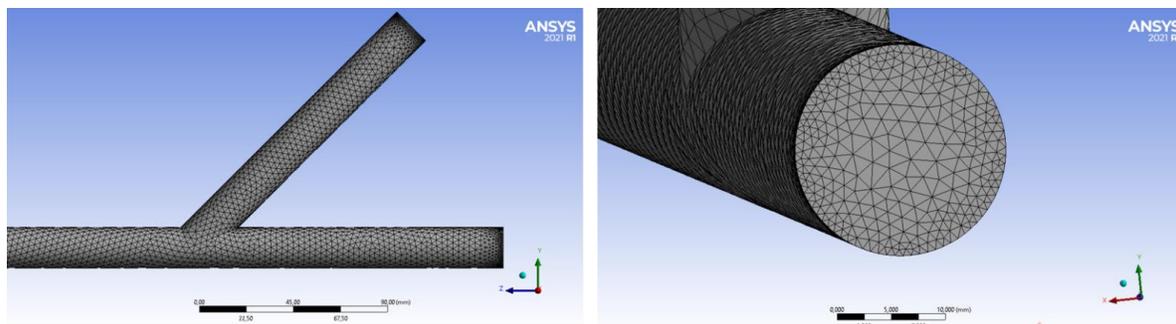


Figura 3- Malha tetraédrica

Fonte: o autor.

### 3.2 Malha Butterfly

Ao fim desses seis resultados, foram selecionados dois casos para que então fossem 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). Sendo 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. Na Figura 4 são apresentadas imagens da Malha *Butterfly* empregada na simulação.

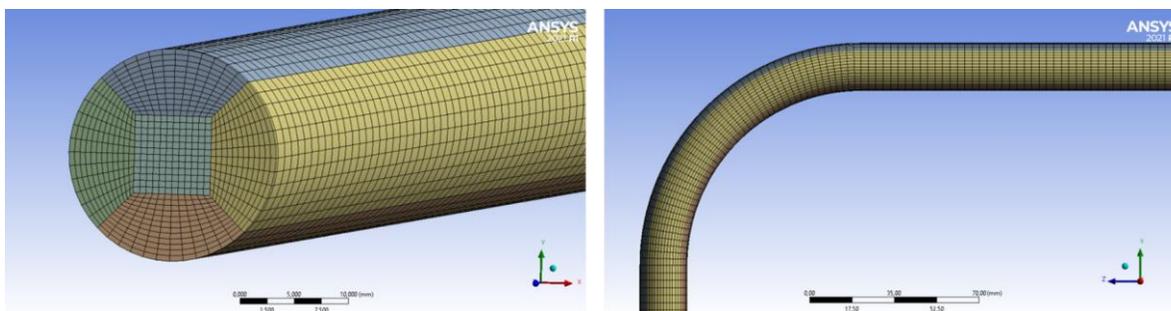


Figura 4 - Seção transversal da malha *butterfly* em trecho ao longo da tubulação e Trecho da malha *butterfly* em região nas proximidades da primeira curva da tubulação

Fonte: o autor.

## 4 RESULTADOS E VALIDAÇÃO

### 4.1 Contornos de fração de volume de ar

Na malha tetraédrica, analisando os resultados dos contornos de fração de volume de ar no primeiro trecho horizontal, verifica-se que, em todos os casos, para ambas as malhas, após a região de entroncamento dos *inlets* é formado um escoamento estratificado. À medida que o ar percorre a tubulação, formam-se ondas instáveis originadas na interface gás-líquido, que posteriormente se desprendem, gerando bolsões de ar.

Na 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 mais bem definida, apresentando feições mais realísticas. Além disso, verifica-se que a região de transição entre o ar e água (regiões em verde) é mais delgada.

Dependendo das velocidades de injeção, diferentes formatos de bolsões de ar são gerados. Neste sentido, para os casos 5 e 6, para ambas as malhas, são observados bolsões de ar mais alongados, característicos do regime de golfada. Por outro lado, analisando os casos 1, 2, 3 e 4, para ambas as malhas, 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 e de bolhas/bolhas alongadas para os casos 1, 2, 3 e 4. Tais constatações vão de encontro com os tipos de escoamento previstos com base no mapa de regime bifásico proposto por Mandhane et al. (1974).

### 4.2 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).

Sendo assim, 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. Dessa forma, após cada pico é verificado um decaimento dos resíduos à medida que iterações são executadas, convergindo até um valor mínimo alvo para todas as variáveis monitoradas, dando início a 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.

### 4.3 Gráficos de pressão dinâmica x tempo

O escoamento contendo fases distintas, de diferentes massas específicas, acarreta na excitação das tubulações e, conseqüentemente, 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 na Figura 5.

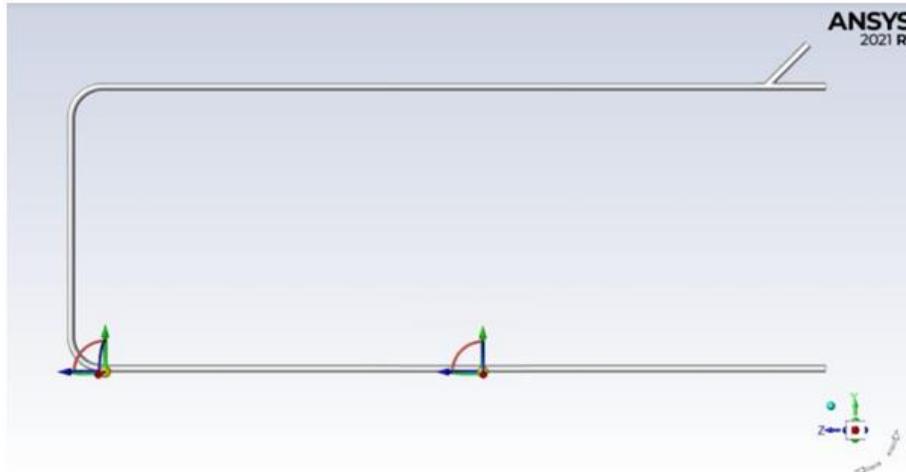


Figura 5 - Pontos de monitoramento de pressão da tubulação

Fonte: o autor.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os gráficos de pressão dinâmica x tempo para os casos 1 e 5 em ambos os pontos de monitoramento:

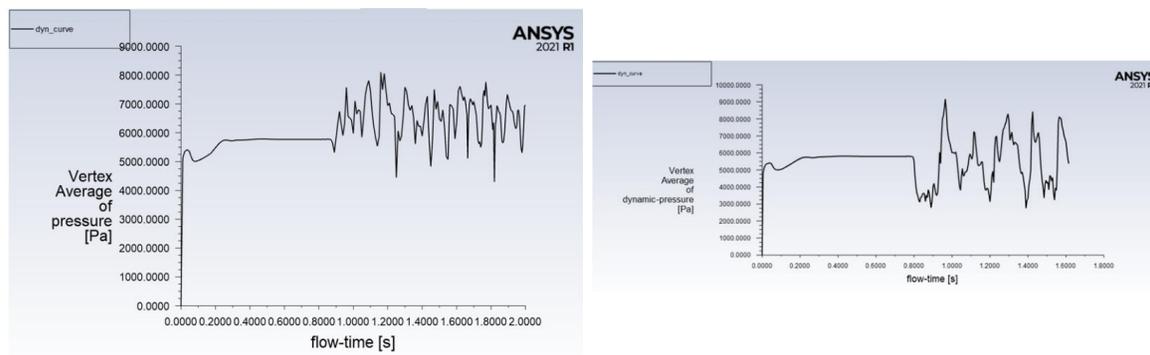


Figura 6 – Monitoramento pressão dinâmica ponto na curva. Esquerda: Caso 1-  $\beta=25\%$ , regime de bolhas alongadas, *Malha butterfly*. Direita: Caso 5-  $\beta=50\%$ , regime de golfadas, *malha butterfly*.

Fonte: o autor.

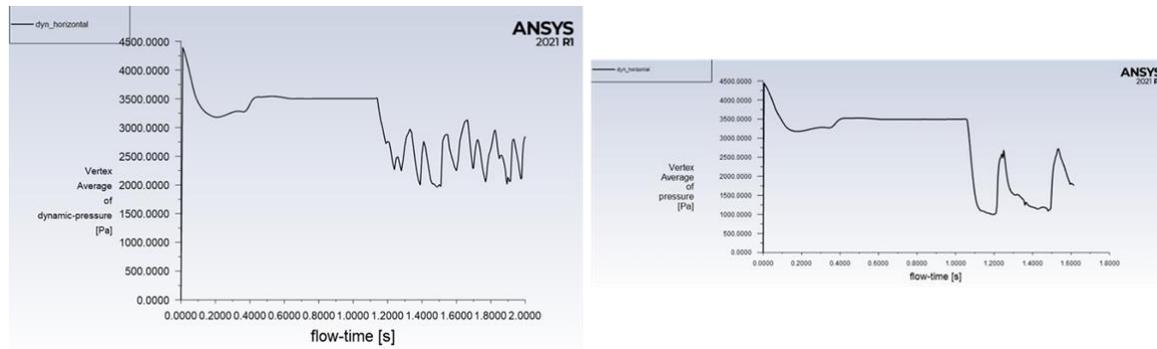


Figura 7 - Monitoramento pressão dinâmica ponto na horizontal. Esquerda: Caso 1-  $\beta=25\%$ , regime de bolhas alongadas, *Malha butterfly*. Direita: Caso 5-  $\beta=50\%$ , regime de golfadas, *malha butterfly*.

Fonte: o autor.

Com relação aos pontos de monitoramento na curva da tubulação, Figuras 6, 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, Figura 7, 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 da quantidade de movimento, acarretando flutuações de pressão.

Pelos gráficos das Figura 6, 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 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 a 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 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 às 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 exhibe 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. Vale a pena ressaltar que o transdutor foi instalado na mesma localidade do ponto de monitoramento de pressão na curva adotado nas simulações aqui apresentadas.

Nas Figuras 8 e 9, são apresentados os gráficos de sinais de força no domínio do tempo com período total de 5 segundos para os casos regime de bolhas alongadas e golfada, respectivamente.

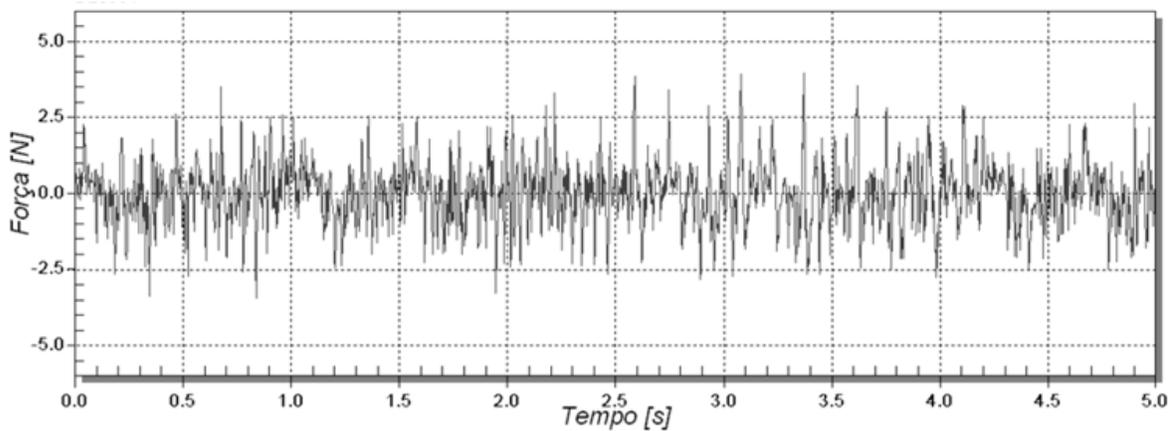


Figura 8 - Sinal no tempo da força dinâmica em escoamento por bolhas

Fonte: Raeder, 2012.

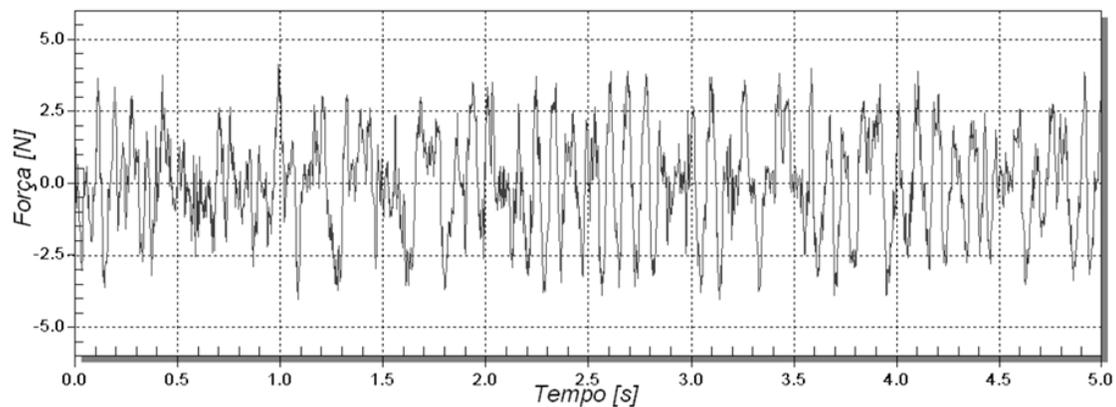


Figura 9 - Sinal no tempo da força dinâmica em escoamento por golfadas

Fonte: Raeder, 2012.

Apesar de se tratar 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 regime de escoamento.

Para regime de bolhas, Figura 6 (simulação, Caso 1) e Figura 8 (teste de bancada), em ambos os casos são observadas oscilações menos acentuadas, porém com uma frequência

de oscilação maior. Enquanto para regime de golfada, Figura 6 (simulação, Caso 5) e Figura 9 (teste de bancada), são verificadas flutuações mais acentuadas, porém com uma frequência de oscilação menor.

## **5. CONCLUSÕES**

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

Além disso, 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 às 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 classificadas como ainda mais críticas.

## **6 SUGESTÕES TRABALHOS FUTUROS**

Com a disponibilização e acesso a uma capacidade 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 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

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.

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.

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.

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.

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

**8 Contribuição dos autores:** LR: conceituação, metodologia, execução de simulações, tratamento e análise de dados, redação, revisão final; RM: supervisão, conceituação, revisão crítica, orientação na redação, disponibilização de laboratório e recursos técnicos.

**Editores:** Bruno Campos Pedroza, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro.

---