

XX Seminário de Pesquisas em Engenharia Mecânica
www.uff.br/petmec

2/2021

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE PLATAFORMA COM CONTROLE DE VIBRAÇÃO PARA ENSAIOS DE ESCOAMENTOS BIFÁSICOS

Ighor Ananias, Igor Guedes

Engenharia Mecânica

Email: ighorananias@id.uff.br, guedesigor@id.uff.br

Resumo: *O estudo tem por objetivo a análise da influência de vibração forçada no padrão de um escoamento bifásico e a perda de carga associada. Para tal, foi elaborada uma seção de teste onde a mistura bifásica água-ar passa por um tubo de vidro borossilicato que é submetido a vibração forçada aplicada por um alto falante subwoofer. Os testes foram realizados para diferentes diâmetros, frequências de vibração e títulos de fração de vazio.*

Palavras-chave: Escoamento bifásico, vibração, perda de pressão.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte das indústrias no mundo trabalham com pelo menos um tipo de fluido em seus processos de fabricação, seja como agente principal da produção, como na extração de petróleo e seus gases, ou como agente secundário, na utilização de fluidos hidráulicos de atuação de válvulas ou em trocadores de calor em processos de refrigeração. Sendo assim, inicialmente define-se um fluido como uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento (tangencial), não importando o quão pequeno seja o seu valor. Como o movimento do fluido continua sobre a aplicação dessa tensão, definimos um fluido também como uma substância que não pode sustentar uma tensão de cisalhamento quando em repouso (Fox et al., 2014).

A composição de fases dos escoamentos é definida por Boni (2007) como “cada aspecto visual homogêneo (uniforme), o qual pode ser contínuo ou não, mesmo quando observado ao microscópio comum”. Escoamentos monofásicos, portanto, são aqueles nos quais independente da composição química do fluido, apresenta apenas uma fase visualmente distinguível por microscópio. Dessa forma, um escoamento simultâneo de água líquida e vapor d’água é um escoamento bifásico de uma única substância.

Escoamentos bifásicos são encontrados em diversas aplicações industriais suportando o funcionamento de equipamentos. Nestes sistemas é comum realizar a propulsão do escoamento com o uso de bombas ou compressores que devido às características intrínsecas à sua construção e funcionamento, causam vibração na tubulação na qual o escoamento ocorre. Em estudos realizados por Kariyasaki (2003) e Chen e Hibiki (2017) observa-se que a ocorrência de vibração externa exerce grande influência no padrão de escoamento no interior de canais, sendo este caracterizado pela disposição espacial entre as fases no interior do canal (Ishi e Hibiki, 2006).

Pela vista dos sistemas vibratórios, este é caracterizado por um corpo ou sistema que se desloca de sua posição de equilíbrio e, a partir dos efeitos de forças de restituição, ultrapassa esta posição, gerando um movimento oscilatório.

O presente estudo tem por objetivo o desenvolvimento, construção e análise de sistema composto por plataforma vibratória com controle de frequência, amplitude e direção de vibração, que atua em um sistema de escoamento de fluido.

A finalidade desta plataforma é servir como suporte e fonte de excitação mecânica para a seção de teste, na qual serão feitos experimentos de padrão de escoamento bifásico gás-líquido, buscando analisar os efeitos das vibrações forçadas sob a qual a tubulação está submetida de acordo com determinados parâmetros termo hidráulicos.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

2.1 Vibração

As vibrações são flutuações em sistemas mecânicos ou estruturais em torno de uma posição de equilíbrio. Elas têm início quando um elemento de inércia se desloca de sua posição de equilíbrio devido a uma energia aplicada ao sistema por uma fonte externa. Uma força ou momento restaurador atua no elemento puxando-o de volta para o equilíbrio, estabelecendo movimentos que se repetem, formando ciclos (Kelly, 2000). O balançar de um pêndulo e o movimento de uma corda de violão ao ser dedilhada são exemplos típicos de vibração.

Em geral, um sistema vibratório compreende um meio para armazenar energia potencial (mola ou elasticidade), um meio para armazenar energia cinética (massa ou inércia) e um meio de dissipação gradual de energia (amortecedor). Dessa forma, um sistema em vibração envolve a transferência alternada de energia potencial para cinética e vice-versa, o que é chamado de sistema massa-mola. Se também houver um amortecedor no sistema, este é chamado de sistema massa-mola-amortecedor, em que determinada quantidade de energia é dissipada a cada ciclo de vibração e há a necessidade de adicionar uma fonte externa caso se deseje manter o regime de vibração (Rao, 2010).

Um dos elementos principais de um sistema vibratório, a mola é um tipo de elo mecânico cuja massa e amortecimento são considerados desprezíveis. Além disso, uma força de reação é desenvolvida na mola sempre que há um movimento relativo entre suas duas extremidades, de modo que a força da mola é dada pela equação (1), onde F é a força da mola, k a rigidez da mola e x sua deformação (Rao, 2010):

$$F = kx \quad (1)$$

2.2 Vibração Forçada Em Tubos

A vibração em sistemas mecânicos com escoamento de fluidos em tubulações está presente em grande parte da indústria de diversos

setores por ser algo inerente ao processo, vide uso de bombas, compressores, válvulas e atuadores que funcionam à base de componentes móveis. A frequência de vibração de um sistema, portanto, deve ser controlada para evitar danos aos equipamentos, catástrofes ambientais, lesões ou morte do pessoal envolvido na operação. No geral, a excitação excessiva é indesejada, pois acelera o processo de falha por fadiga, aumenta as folgas existentes e reduz o torque em fixadores móveis, o que diminui a vida útil das peças e aumenta a necessidade de manutenção. (Rao, 2010)

No entanto, dependendo da forma como a vibração é aplicada e controlada, acredita-se ser possível aumentar a eficiência térmica de um sistema. De acordo com Chen e Hibiki (2017), a vibração forçada influencia no padrão de escoamento bifásico no interior de canais. De forma geral, isto ocorre devido à coalescência das bolhas de gás que se unem com a ocorrência da vibração, o que aumenta o título de vapor. Consequentemente, como em geral os gases possuem menor coeficiente de transferência de calor que os líquidos, a transferência de calor nesses casos é reduzida. Além disso, Nangia (1967) concluiu que a vibração forçada também aumenta o coeficiente de transferência de calor por reduzir a camada limite térmica.

2.3 Escoamento Bifásico

Um escoamento bifásico é descrito como um escoamento com a presença de duas fases, podendo ser dos tipos líquido-líquido, líquido-sólido, líquido-gás ou gás-sólido (Awad, 2012). Muitos estudos foram realizados e diferentes classificações foram sugeridas para mapear os padrões de escoamento. Segundo Taitel & Dukler (1976), estes trabalhos buscaram coletar dados para taxas de fluxo e propriedades de fluido, para conseguir observar visualmente o padrão do escoamento através de uma seção de teste transparente. No entanto, a imprecisão nas descrições dos padrões devido à subjetividade da observação visual de cada indivíduo resultou na criação de diversas classificações de padrão de escoamento a partir destas pesquisas.

O padrão de escoamento possui forte relação com a pressão, temperatura e a vazão, que por sua vez influenciam no padrão e estrutura interna do escoamento bifásico (Brill, 1991). Outro parâmetro relevante é a direção do escoamento, levando em consideração somente as direções horizontal e vertical, quando o escoamento bifásico ocorre na direção vertical o padrão de escoamento sofre efeitos mais relevantes do empuxo e da força da gravidade. Sendo assim,

apesar da classificação dos padrões de escoamento serem parecidas, em escoamentos bifásicos na direção horizontal se diferem. (Brill, 1991).

2.4 Padrões De Escoamento Bifásico

Escoamentos bifásicos podem ser classificados de acordo com sua estrutura de interface em vários grupos principais, chamados de padrões e espera-se que muitos desses escoamentos tenham certo grau de similaridade física quando os padrões são os mesmos (Ishii & Hibiki, 2011).

Segundo Monni et al (2014), o escoamento gás-líquido na direção horizontal, pode ser classificado em quatro diferentes estruturas de escoamento: escoamento estratificado, escoamento de bolhas dispersas, escoamento intermitente e escoamento anular. E estes possuem subdivisões: escoamento estratificado divide-se em liso e ondulado, escoamento intermitente em *slug* (bolhas alongadas) e *plug* (pistonado), o escoamento anular em suave, ondulado e nebuloso

O escoamento estratificado possui separação completa das duas fases, gás e líquido, e o líquido tende a fluir na parte inferior do tubo devido aos efeitos da gravidade como na Figura 2.1, representando o estratificado liso, e na Figura 2.2, representando o estratificado ondulado, sendo possível assim distinguir o escoamento em três regiões: região de líquido, região de interface e região de gás.



Figura 2.1 - Escoamento estratificado liso (Nevers, 1991)



Figura 2.2 - Escoamento estratificado ondulado (Nevers, 1991)

O escoamento de bolhas dispersas é caracterizado pela presença de bolhas de gás dispersas em uma fase líquida contínua, e os efeitos da gravidade e do empuxo fazem com que ocorra uma concentração maior na metade superior do tubo como ilustrado na Figura 2.3.



Figura 2.3 - Escoamento de bolhas dispersas (Nevers, 1991)

O escoamento *slug* possui uma estrutura muito próxima à estrutura do escoamento *plug*, e por esse motivo ambos são classificados como escoamentos intermitentes. No padrão do tipo *slug/plug* há uma sucessão de bolhas alongadas de ar cujo diâmetro é próximo ao diâmetro do cano. A bolha de gás se propaga ao longo do tubo com uma velocidade maior que a velocidade do filme, produzindo um arrastamento de gás e alongando as bolhas como nas Figura 2.4 e Figura 2.5.



Figura 2.4 - Escoamento Slug (bolhas alongadas) (Nevers, 1991)



Figura 2.5 - Escoamento Plug (pistonado) (Nevers, 1991)

O escoamento anular é caracterizado pela presença de um filme líquido contínuo nas paredes em volta de um núcleo de gás (fase gás contínua) com uma porcentagem variável de gotículas líquidas (fase líquida dispersa). Admitindo a hipótese do escoamento totalmente desenvolvido, teoricamente é possível definir as três regiões: região do filme, a região da interface e a região do núcleo. A fração de vazio na região do núcleo pode variar dependendo do equilíbrio atingido entre o arrastamento das gotas e a taxa de deposição representado na Figura 2.6.



Figura 2.6 - Escoamento Anular Suave (Nevers, 1991)

2.5 Perda De Pressão

Em escoamentos bifásicos a perda de pressão total advém do somatório de três parcelas, a friccional, aceleracional e a gravitacional (Wallis, 1969). A fração relacionada às perdas aceleracional e gravitacional são baseadas em modelos e variações do título de vapor e fração de

vazio. A perda friccional, em geral, é determinada por correlações empíricas e são geradas a partir do atrito entre o escoamento bifásico e a parede do tubo, e também pelo atrito entre as fases, dependendo assim das propriedades do líquido e vapor, título de vapor, velocidade mássica, geometria e características superficiais do canal, e padrão de escoamento (Kanizawa, 2010).

Segundo Çengel (2006), o título de vapor (s) na Eq. (1) é a razão entre a vazão mássica de vapor (\dot{m}_g) e vazão mássica total (\dot{m}) do sistema independentemente do equilíbrio termodinâmico entre as fases, sendo assim uma propriedade básica em escoamentos bifásicos.

$$s = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}} \quad (1)$$

Experimentalmente é possível determinar o título de vapor de escoamentos bifásicos no qual a fase gasosa é não condensável, como no caso do uso de ar e água. como mostra a Eq. (2):

$$s = \frac{j_g \rho_g}{j_g \rho_g + j_l \rho_l} \quad (2)$$

No qual j é a velocidade superficial, ou fluxo volumétrico, ρ corresponde à massa específica e os índices g e l significam, respectivamente, as fases gasosa e líquida. Para cálculo da velocidade superficial, utiliza-se a razão entre a vazão volumétrica e a área da seção transversal do canal (Kanizawa, 2021).

$$j = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

3. METODOLOGIA

A instrumentação utilizada para este estudo pode ser dividida em uma fonte de vibração, um sistema de compressão de gás e um de bombeamento de líquido, em que todos possuem seus respectivos equipamentos de aferição e controle. Os itens de cada sistema estão representados esquematicamente na Figura 3.1 e detalhados nos tópicos a seguir desta seção.

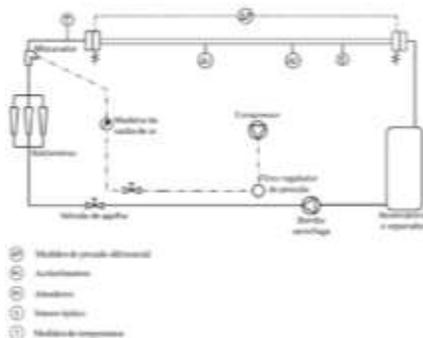


Figura 3.1 - Esquemático do sistema de escoamento (Autor)

3.1. Região De Escoamento De Fluido

Região na qual ocorre escoamento do fluido monofásico e bifásico. Inicialmente nessa região, duas linhas paralelas delimitam os escoamentos líquido e gasoso. Para obtenção do ar, foi utilizado um compressor conectado a um filtro regulador de pressão, visando a manutenção da pressão do gás. Em seguida, o ar percorre por um aferidor de vazão e, então, alcança o misturador para iniciar a região bifásica.

Paralelamente, na linha de fase líquida o início se dá em um reservatório de água destilada onde o líquido é bombeado para o sistema por meio de uma bomba centrífuga. Então, através de mangueiras de silicone de 6 mm de diâmetro interno, passa por um medidor de temperatura, uma válvula agulha e rotômetros para controle e aferição da vazão. Por fim, o fluido segue para o misturador para iniciar a região bifásica.

A partir do misturador, local no qual ocorre a confluência dos escoamentos das linhas líquida e gasosa, o fluido segue para um tubo de vidro borossilicato onde ocorre a seção de testes e visualização, com diâmetro previamente definido de acordo com a metodologia proposta por Kew e Cornwell (1997) para análise de canais de dimensões convencionais, de transição e mini canais. Nesta região, a perda de pressão do escoamento é aferida utilizando um medidor de pressão diferencial piezo-resistivo e o registro visual do padrão de escoamento é realizado por uma câmera de alta velocidade.

3.2. Sistema De Vibração

O sistema vibratório imposto à seção de teste é composto de um par de molas nas extremidades, um atuador e um acelerômetro no centro da seção, como indicado na Figura 3.1 anteriormente. O atuador é um alto falante subwoofer que transmite a vibração em contato direto com a tubulação e sua amplitude é configurada no próprio aparelho de som.

As especificações da mola foram calculadas de acordo com a Equação (4) de um sistema massa-mola, na qual o numerador “ $2k$ ” representa o coeficiente de elasticidade equivalente do sistema para o caso de duas molas em paralelo, no qual os coeficientes de cada mola se somam, visto que a o deslocamento de molas em paralelo é o mesmo. A massa m é o somatório das massas de cada componente da plataforma. O intervalo de frequência de vibração definido é de 25 a 75 Hz para simular a frequência de operação de um equipamento de condicionamento de ar

doméstico. Dessa forma, é possível determinar o coeficiente k necessário para as molas do sistema.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{2k}{m}} \quad (4)$$

3.3. Registro E Análise De Dados

O sistema de controle e medição da vibração foi implementado com o microcontrolador Arduino Uno para leitura dos dados do acelerômetro e do transdutor de pressão. O programa faz a calibração e registra os dados obtidos do sensor em tempo real, com um intervalo de acelerações de $\pm 2g$.

Após a obtenção dos dados do acelerômetro, estes serão tratados por meio do software de código aberto *Scilab 6.1.0* para a construção de gráficos. O gráfico de aceleração (m/s^2) por tempo (s) é plotado transformando os dados obtidos do Arduino em unidades de g para m/s^2 multiplicando-se pela constante g de valor igual a $9,81 m/s^2$. Para o gráfico de aceleração (m/s^2) por frequência (Hz), uma transformada rápida de Fourier é aplicada utilizando a função FFT (*Fast Fourier Transform*), a qual é nativa do Scilab e representa um algoritmo computacionalmente mais eficiente da Transformada Discreta de Fourier (DFT em inglês, Discrete Fourier Transform), com o objetivo de determinar a distribuição espectral do sinal de saída para a obtenção da frequência real de vibração do sistema, onde a intensidade é normalizada para melhor visualização.

4. RESULTADOS

Até o momento da divulgação deste artigo, os experimentos não foram realizados e por esse motivo não é possível descrever uma conclusão. Contudo, é esperado que seja possível observar visualmente os impactos da vibração nos padrões de escoamento e analisar a perda de pressão sofrida ao longo da seção de teste, avaliando o efeito de parâmetros como pressão, frequência de vibração e fração de vazio no padrão do escoamento bifásico.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer primeiramente às amigadas construídas ao longo de toda graduação, nossas famílias, por todo auxílio e incentivo à uma equação de qualidade e por fim, ao Rian Mauricio, nosso coorientador, por toda ajuda durante todo processo de pesquisa e execução de tarefas. Agradecer também ao Alex, técnico no laboratório de usinagem da

Universidade Federal Fluminense e ao nosso orientador, Fábio Kanizawa.

REFERÊNCIAS

- [1] ARDUINO E CIA, Acelerômetro e Giroscópio MPU6050, 2015. <https://www.arduinoecia.com.br/acelerometro-giroscopio-mpu6050-arduino/>. Acesso em: 07/06/2021.
- [2] Baker, O. **Simultaneous Flow of Oil and Gas**. Oil Gas J., 53, 185 (July, 1954).
- [3] Beck, S; Collins, R. **Moody Diagram**. Lines created using Swami and Jaine formula. University of Sheffield, 2018.
- [4] Boni, Luis Alcides Brandini De; GOLDANI, Eduardo. **Introdução Clássica à Química Geral**. Porto Alegre, Ed. Tchê Química Cons. Educ. LTDA, 2007.
- [5] Çengel Y. A., Boles M. A. **Termodinâmica**. Mcgraw-Hill, 5ª Edição, 2006
- [6] Chen, S.-W., Hibiki, T., Ishii, M., Mori, M., & Watanabe, F. **Experimental investigation of horizontal forced-vibration effect on air-water two-phase flow**. International Journal of Heat and Fluid Flow, 65, 33–46. 2017. DOI:10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.03.004
- [7] F. Dong, F. S. Zhang, W. Li & C. Tan. **Comparison of differential pressure model based on flow regime for gas/liquid two-phase flow**. Journal of Physics: Conference Series, Volume 147, The 6th International Symposium On Measurement Techniques For Multiphase Flows 15–17. Dezembro,er 2008, Naha, Okinawa, Japão.
- [8] Fox, Robert W.; McDonald, Alan T.; Pritchard, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5ª. 2014.
- [9] G.W. Govier and K. Aziz, **The Flow of Complex Mixtures in Pipes**, Van Nostrand Reinhold, New York, 1972, p.503
- [10] Incropera F. P.; Dewitt, P. D. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- [11] Ishii, Mamoru; Hibiki, Takashi. **Thermo-fluid dynamics of two-phase flow**. Springer Science & Business Media, 2010.
- [12] Kanizawa, F. Ribatski, G. **Flow Boiling and Condensation in Microscale Channels**. Springer Nature, 2021.
- [13] Kanizawa, F., Hernandez, R. & Ribatski, G. (2010). **Estudo teórico da perda de pressão para escoamentos bifásicos no interior de tubos com fitas retorcidas**. 2º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos São Carlos, 3 - 4 de Maio de 2010

- [14] Kariyasaki, Akira & Ousaka, Akiharu & Fukano, Tohru & Kagawa, Masazumi. **The Effects of Forced Vibration on Two-Phase Flow in a Small Diameter Tube**. 2003. DOI: 10.1115/FEDSM2003-45380.
- [15] Kelly S.G, **Fundamentals of Mechanical Vibrations**, Second Edition, McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering, ISBN 0-07-230092-2. (2000)
- [16] Kew, Peter A.; Cornwell, Keith. **Correlations for the prediction of boiling heat transfer in small-diameter channels**. Applied thermal engineering, v. 17, n. 8-10, p. 705-715, 1997.
- [17] LimalMA, Sílvia C. R. V. et al . **Curvas de desempenho de válvulas reguladoras de pressão novas e com diferentes tempos de utilização**. Rev. bras. eng. agríc. ambient., Campina Grande , v. 7, n. 2, p. 201-209, Aug. 2003 .
- [18] Litwhiler, Dale H.; **A Custom Vibration Test Fixture Using a Subwoofer**. Penn State University, 2011.
- [19] M., M. Awad. Two-Phase Flow. An Overview of Heat Transfer Phenomena. 2012. DOI:10.5772/54291
- [20] Mandhane, J. M., Gregory, G. A., & Aziz, K. (1974). **A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes**. International Journal of Multiphase Flow, 1(4), 537–553.
- [21] Monni, G., De Salve, M., & Panella, B. (2014). **Horizontal two-phase flow pattern recognition**. Experimental Thermal and Fluid Science, 59, 213–221.
- [22] Nangia, K. K.; Chon, W. Y. Some observations on the effect of interfacial vibration on saturated boiling heat transfer. AIChE Journal, v. 13, n. 5, p. 872-876, 1967.
- [23] Neely, David F; **Effect of Vibration on Heat Transfer from cylinders in free convection**. United States, Air force Institute of Technology, 1964.
- [24] Nevers, Noel de, **Fluid Mechanics for Chemical Engineers**, Hill International Editions, 2° edição, 1991
- [25] S. Rao. **Mechanical Vibrations**. Prentice Hall, 5th edition, 2010.
- [26] Taitel, Y., & Dukler, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. AIChE Journal, 22(1), 47–55. 1976. DOI:10.1002/aic.690220105
- [27] V. P. Singh, **Mechanical Vibrations**, Dhanpat Rai & Co., 2001.
- [28] von Bernuth, R.D.; Baird, D. Characterizing pressure regulator performance. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.33, n.1, p.145-150, 1990.
- [29] Wallis, G.. **One Dimensional Flow**. McGraw-Hill Book Company,, 1969.
- [30] Wang, Z. & Pan, Z. 2015. Preparation of hierarchical structured nano-sized/porous poly(lactic acid) composite fibrous membranes for air filtration. Applied Surface Science, 356, 1168-1179.
- [31] Wong, A. K. H., & James, R. W. **Multiple liquid chillers: Intelligent control**. Building Services Engineering Research and Technology, 11(4), 125–128. 1990. DOI:10.1177/014362449001100402.