



Formação de bolhas em um tubo de Venturi

Bubble development inside a Venturi tube

Adair Bueno de Godoy Netto¹, Fábio Kenji Suguimoto², Marcos Antonio de Souza Lourenço³

RESUMO

Em escoamentos líquidos, onde a pressão atinge valores baixos o suficiente, como aqueles abaixo da pressão de vapor do líquido a uma dada temperatura, bolhas são formadas pelo fenômeno de ebulição em massa e, após crescer em tamanho por coalescência, elas podem chegar a regiões de alta pressão, implodindo e potencialmente danificando superfícies sólidas adjacentes. O objetivo deste trabalho é analisar as condições necessárias para a formação das bolhas em um fluxo simplificado, utilizando as equações de conservação de massa e quantidade de movimento. A discretização numérica das equações são feitas pelo método de volumes finitos, utilizando esquemas de segunda ordem tanto em tempo quanto em espaço, usando o reconhecido *software* livre, *OpenFOAM*. A simulação desempenha-se para o desenvolvimento do campo de velocidade até um estado estável para a vazão laminar de água internamente ao Tubo de Venturi. Os resultados para a variação do campo de pressão ao longo do tubo de Venturi são apresentados, bem acordados com a teoria.

PALAVRAS-CHAVE: bolhas; pressão; *softwares*.

ABSTRACT

In liquid flows, where the pressure reaches a low enough value, such that it is below the vapor pressure of the liquid for a given temperature, bubbles arise by the bulk phenomenon of boiling and, after increasing in size by coalescence, they could reach regions of higher pressure, imploding and potentially damaging adjacent solid surfaces. The aim of this work is to analyze the necessary conditions for bubbles to form in a simplified flow, using the equations for the mass and momentum conservation. The numerical discretization of the equations are made by the finite volume method, using schemes of second order in both space and time, using the well know free software, *OpenFOAM*. The simulation is carried out by the solution of the velocity field until steady state for the laminar flow of water inside a Venturi tube. The results for the pressure field variation across the Venturi tube are presented, and they agree well with the theory.

KEYWORDS: bubbles; pressure; *softwares*.

INTRODUÇÃO

É sabido da mecânica dos fluidos que o escoamento de fluidos pode ocorrer, entre outras causas, a partir de um potencial ou gradiente de pressão. Para escoamentos ditos incompressíveis, ou seja, aqueles ocorrendo em baixos números de Mach, a presença de um campo de velocidade também pode induzir um campo de pressão e ambos os fenômenos são indissociáveis, sendo essa relação equacionada para fluidos ideais por Daniel Bernoulli em 1738.

Em escoamentos de fluidos, nos quais a pressão atinge valores suficientemente baixos, de modo que esteja abaixo da pressão de vapor do líquido, para uma dada

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: AdairNetto@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0411312353363209>.

²Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. Email: fsuguimoto@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8270074009363056>.

³Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. Email: mlourenco@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8818311395718614>.



temperatura, ocorre o surgimento de bolhas, que podem aumentar em tamanho devido ao fenômeno de coalescimento. Ao longo do escoamento, essas bolhas podem atingir regiões de pressão suficientemente altas para essas bolhas implodirem com o risco de danificarem as superfícies sólidas adjacentes. Ao serem desfeitas, as bolhas de vapor geradas implodem podendo danificar materiais próximos a elas, esse fenômeno é conhecido como cavitação, como descrito por Takemura e Matsumoto (*apud.*, Sobrinho, 2019, p.17) e ensaiado por Meneses e Santos (2018).

O objetivo aqui buscado é identificar computacionalmente, através de *softwares* semelhantes aos apresentados por Ferziger e Peric (2002), a região de formação destas bolhas, servindo de base para estudos futuros na implementação de um modelo de mudança de fase.

MATERIAIS E MÉTODOS

As equações base para análise do fluxo foram as equações de Conservação da Massa, Eq. (1), e de Quantidade de Movimento, Eq. (2), simplificadas a partir de White (2011) ao estabelecer-se que o escoamento formado é invíscido, considerando que será tomado a partir de uma linha central de um tubo, bidimensional e atua em regime permanente sem influência relevante da gravidade, deste modo:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla p \quad (2)$$

A primeira nos garante que a vazão mássica na entrada e na saída do volume de controle serão sempre iguais, causando uma relação inversamente proporcional entre a área transversal de escoamento e a velocidade do mesmo, uma vez mantida constante a densidade do fluido, sendo utilizada a água como o fluido das modelagens aqui estabelecidas.

Semelhante é a função da segunda equação, garantindo que a entrada e saída de quantidade de movimento são iguais, na qual foi desprezada a atuação da gravidade sobre o fluido.

As equações supracitadas foram aplicadas principalmente pelos *softwares* utilizados, os quais analisaram ponto a ponto o desenvolvimento de um escoamento de um fluido com viscosidade cinemática (ν) de 10^{-6} m²/s, representando a água à 20°C, de maneira interna à um tubo de Venturi com 1,26 m de comprimento, raio maior (na entrada do volume de controle) de 0,05 m, reduzindo-se a partir 0,1 m do tubo com uma angulação de 20° até atingir um raio de 0,015 m na menor seção, valor este que será mantido por 0,06 m de extensão e logo após, com uma angulação de 10°, o raio da área transversal do escoamento aumentará até atingir novamente seus 0,05 m iniciais, com os quais permanecerá até a saída do volume de controle.

Na entrada do tubo aplicou-se um perfil de velocidade uniforme com gradiente de pressão nulo, área laranja da Figura 1, implicando em uma pressão constante, enquanto que a saída do conjunto ocorreria em uma pressão manométrica nula acompanhada de um campo de velocidades de derivada também nula, área azul da Figura 1.

Além das equações utilizadas acima, foi também aplicada a fórmula para o cálculo do número de Reynolds, Eq. (3), adaptada de Fortuna (2000, p.29), buscando limitar o valor

inicial do perfil de velocidade na entrada do escoamento de modo a garantir que este seja classificado como laminar, simplificando sua análise.

$$Re = \frac{u d}{\nu} \quad (3)$$

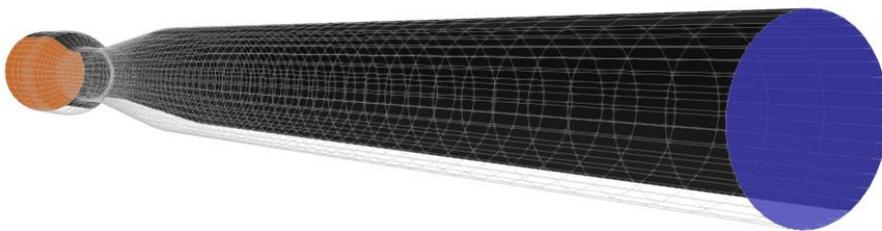
Considerando os valores citados anteriormente, optou-se por uma velocidade unidirecional de 0.004 m/s, a qual garante um número de Reynolds de 400, valor esse muito abaixo do limite de transição entre um escoamento em regime laminar e transiente, sendo este valor estabelecido por Osborne Reynolds e apresentados em Çengel e Cimbala (2014, p.350) para escoamentos internos como estando em cerca de 2300.

O principal *software* utilizado para execução do experimento foi o *OpenFOAM*, o qual discretiza e resolve equações através do método de volumes finitos, tal utilização foi capaz de estabelecer o modo como seguiria o fluxo a partir do posicionamento de vetores representando os vértices formadores da malha analisada ligados de maneira a formar paredes adiabáticas de espessura infinitesimal.

A malha gerada através do *software* foi então modificada de modo a se adequar aos estudos aqui realizados, passando por um maior refinamento próximo à região do gargalo, onde a malha foi constituída por um número maior de pontos, ocorrência justificada por dois principais motivos: um refino “natural” para manter a conectividade entre os pontos criados e o fato desta região ser dotada de variações mais bruscas de velocidade e, conseqüentemente, pressão, sendo a última o foco da análise a ser feita neste trabalho, totalizando ao final do refinamento 28600 volumes finitos.

A visualização dos gradientes de velocidade e pressão formados foram possíveis graças à aplicação dos dados no *software Paraview*, a partir do qual foram obtidas as imagens da malha, como apresentado na Figura 1, e os dados relacionados a mesma aplicados em *Excel* para formar o gráfico referente à distribuição da pressão ao longo de uma linha central ao escoamento.

Figura 1 – Malha do Tubo Venturi



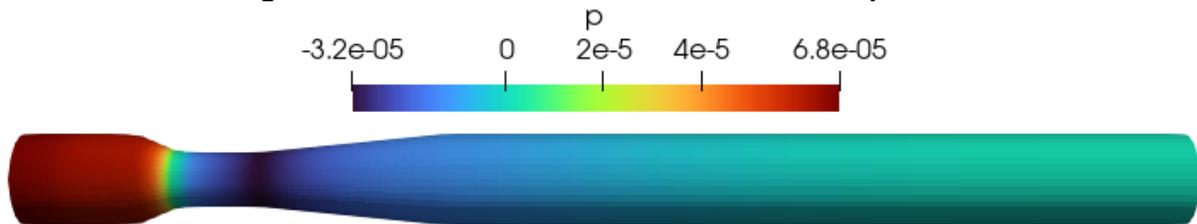
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para geração dos dados foi utilizado o *solver SimpleFOAM* para fluidos incompressíveis, resultando em uma convergência de dados relativamente rápida quando comparada aos testes iniciais que tomavam horas de processamento.

Os dados gerados puderam ser visualizados e melhor compreendidos através das figuras geradas pelo *Paraview*, tal como na Figura 2.

Figura 2 – Vista Lateral do Modelo com escala de pressão

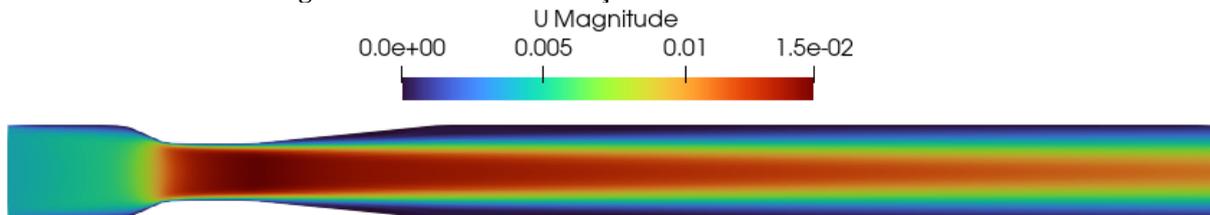


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O primeiro fato perceptível é variação abrupta de pressão na região próxima ao ponto de estrangulamento, chegando ao valor mínimo registrado, e, posteriormente, aumentando de forma gradual até atingir o valor nulo da face de saída.

A velocidade do escoamento também foi analisada, sendo melhor visualizada através de uma seção lateral média do escoamento, de modo a demonstrar sua variação de acordo com a condição de não deslizamento em regiões próximas às paredes, como ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Vista lateral da seção média de acordo com a velocidade.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

O aumento da velocidade acompanhando a redução da área transversal é facilmente visualizado na entrada do gargalo na figura, condizendo com a Eq. (1), esse aumento de velocidade, embora diminua ao longo do escoamento, é melhor mantido ao longo da linha central do escoamento, onde a atuação dos efeitos de borda é menor.

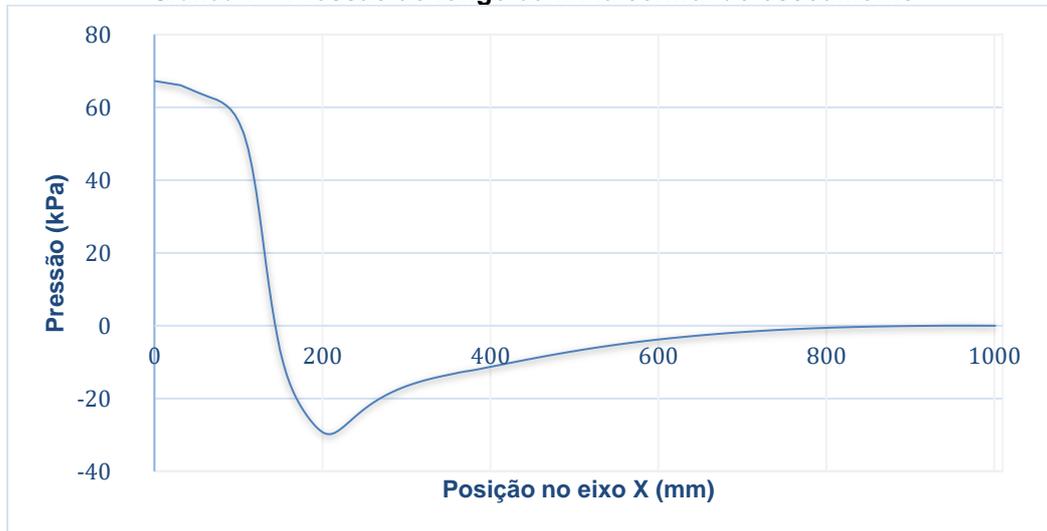
A comparação entre as figuras 2 e 3 pode ser feita referente aos valores de pressão manométrica e velocidade atuando de maneira inversamente proporcional, tal como proposto pela Eq. (2), resultando em menores valores de pressão onde a velocidade do escoamento é maior.

Através da calculadora disponibilizada pelo *site The Engineering ToolBox* foi constatada que a pressão mínima para uma mudança de estado da água para vapor à 20°C seria de 2,34 kPa, sendo quaisquer valores abaixo característicos de zonas capazes de formar bolhas de vapor em meio ao fluxo.



Para facilitar a análise quantitativa dos resultados apresentados pelo *Paraview* formou-se um gráfico com a variação da pressão ao longo do eixo X do eixo central de toda extensão do tubo, representado como Gráfico 1.

Gráfico 1 – Pressão ao longo da linha central do escoamento



Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

Vale ressaltar que os valores registrados tratam-se de pressão manométrica, não sendo, portanto, “negativos”, mas sim valores abaixo da pressão atmosférica, aqui adotada como sendo 100 kPa e, portanto, sendo necessária uma pressão manométrica de -97,66 kPa para iniciar o surgimento de bolhas. Ainda assim, em pontos a partir de 178 mm já seria plausível a formação de bolhas, uma vez que o gradiente de pressão se encontra negativo nestes pontos, sendo ainda mais alarmante em 261 mm, representando o ponto mais baixo do gráfico, uma vez que quanto menor for a pressão do vapor da bolha mais danosa será sua implosão, embora bolhas de vapor sejam formadas e sofram coalescência durante todo o período indicado.

Ainda que os valores absolutos de pressão se encontrassem abaixo do limite de 2,34 kPa para mudança de fase o *solver SimpleFOAM* não seria capaz de gerar as bolhas de vapor propriamente ditas, sendo necessário para tal modelos e *solver* adequados para esse tipo de operação.

CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizada uma simulação do escoamento em um tubo de Venturi, a partir da qual determinou-se o campo de pressão a partir da linha de centro. A variação de pressão ocorreu conforme já relatado na literatura.

O objetivo futuro dessa pesquisa é a identificação e caracterização de regiões do escoamento propensas à formação de bolhas por mudança de fase. A ferramenta *OpenFOAM* se mostrou apta, não somente para a determinação dos resultados, mas também na geração de malha e em alguns passos do pós-processamento.



AGRADECIMENTOS

Agradece-se especialmente à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por disponibilizar tanto bases teóricas para os estudos do caso, quanto físicas computacionais para execução dos modelos simulados.

CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

THE ENGINEERING TOOLBOX (2004). **Water - Saturation Pressure vs. Temperature**. [online]. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-d_599.html. Acesso em: 20 set. 2023.

WHITE, Frank. **FLUID MECHANICS**. 7. ed. McGraw-Hill: New York, 2011.

ÇENGEL, Yunus; CIMBALA, John. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3. ed. McGraw-Hill: Estados Unidos, 2014.

FORTUNA, Armando de Oliveira. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**. 1. ed. Edusp: São Paulo, 2000.

FERZIGER, Joel; PERIC, Milovan. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. 3. ed. Springer: Berlin, 2002.

SOBRINHO, Angelo Lucas. **Dimensionamento de um tubo de Venturi para geração de microbolhas a ser utilizado em skimmer doméstico**. 2019. p.1-63. Curso de Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG, Brasil, 2019.

MENESES, Camila; SANTOS, Renata. **COMPARAÇÃO ENTRE OS EFEITOS DA CAVITAÇÃO EM ALUMÍNIO E BRONZE**. p.1-21. Faculdade de Engenharia Industrial Mecânica - Universidade Santa Cecília, Santos – SP, Brasil, 2018.