

APLICAÇÕES DE SIMULAÇÃO CFD EM TUBOS DE VENTURI UTILIZANDO O SOFTWARE OPENFOAM NA FORMAÇÃO DE FÍSICOS E ENGENHEIROS

Thauã Albert da Graça Santos (Universidade Federal de Alagoas – Campus Arapiraca Unidade Educacional de Penedo) E-mail: thaua.santos@arapiraca.ufal.br
Nuccia Carla Arruda de Sousa (Universidade Federal de Alagoas – Campus Arapiraca Unidade Educacional de Penedo) E-mail: nuccia.sousa@penedo.ufal.br

Resumo: As atividades experimentais contribuem para a formação acadêmica do graduando demonstrando as relações entre os conceitos teóricos e a aplicação prática. Diante disso, é de relevância os recursos didáticos para laboratórios, em especial na disciplina de mecânica dos fluidos onde os fenômenos são altamente visuais, uma das opções são os ambientes virtuais de simulação e modelagem. Este estudo tem como objetivo simular um escoamento interno de um fluido incompressível dentro de uma tubulação de diâmetros variáveis, por meio da Fluidodinâmica Computacional, utilizando o software de código aberto *OpenFOAM*, avaliando os resultados de pressão cinemática e velocidade por meio da equação de Bernoulli. Foi realizada uma modelagem em fluidodinâmica computacional composta de três etapas: pré-processamento, onde foi utilizado o software externo *Gmsh* para a criação do modelo geométrico e da malha computacional; processamento, onde foi utilizado o *OpenFOAM* para definição das condições de contorno e cálculo das variáveis de fluxo, sendo que as equações de governo dos fluidos foram discretizadas pelo Método dos Volumes Finitos; e pós-processamento, onde foi utilizado o software *Paraview* para visualização dos resultados. Os resultados para a pressão cinemática e velocidade nos pontos da linha de corrente do centro da tubulação e aplicados na equação de Bernoulli mostram que a equação é uma relação aproximada com limitações, não podendo ser aplicada em todas as regiões do escoamento como, por exemplo, nas regiões próximas de superfícies sólidas ou em dutos estreitos, sendo necessário avaliar os resultados obtidos considerando os fenômenos de perda de carga presente em escoamentos internos.

Palavras-chave: Teorema de Bernoulli, Fluidodinâmica Computacional, OpenFOAM.

CFD SIMULATION APPLICATIONS IN VENTURI TUBES USING OPENFOAM SOFTWARE IN THE TRAINING OF PHYSICISTS AND ENGINEERS

Abstract: Experimental activities contribute to the undergraduate's academic training by demonstrating the relationships between theoretical concepts and practical application. In view of this, teaching resources for laboratories are relevant, especially in the subject of fluid mechanics where phenomena are highly visual, one of the options being virtual simulation and modeling environments. This study aims to simulate an internal flow of an incompressible fluid inside a pipe of variable diameters, through Computational Fluid Dynamics, using the open source software *OpenFOAM*, evaluating the results of kinematic pressure and velocity using the Bernoulli equation. Computational fluid dynamics modeling was carried out, consisting of three stages: pre-processing, where the external software *Gmsh* was used to create the geometric model and computational mesh; processing, where *OpenFOAM* was used to define the boundary conditions and calculate the flow variables, with the fluid governing equations being discretized using the Finite Volume Method; and post-processing, where the *Paraview* software was used to visualize the results. The results for the kinematic pressure and velocity at the points of the streamline at the center of the pipe and applied to the Bernoulli equation show that the equation is an approximate relationship with limitations and cannot be applied to all regions of the flow, for example, in regions close to solid surfaces or in narrow ducts, it is necessary to evaluate the results obtained considering the pressure loss phenomena present in internal flows.

Keywords: Bernoulli's theorem, Computational Fluid Dynamics, OpenFOAM.

1. Introdução

As atividades experimentais permitem ao graduando estabelecer conexões entre os conceitos teóricos e o universo físico, científico e tecnológico contribuindo para a formação acadêmica do aluno. Com isso, é de relevância os recursos didáticos para laboratórios nos cursos de graduação, em especial na disciplina de mecânica dos fluidos onde os fenômenos são altamente visuais.

Apesar da prática experimental ser de fundamental importância para a construção da competência investigativa do estudante, um dos objetivos fundamentais do ensino, os docentes muitas vezes encontram dificuldades de material para implementação de tal atividade. Contudo, os avanços tecnológicos aplicados à área da educação, principalmente com o uso cada vez mais acessível de computadores nos meios educacionais, trazem novas ferramentas didáticas a serviço do professor, sendo necessária uma constante atualização da exploração dos meios de ensino, cuja a finalidade é tornar as aulas mais atrativas e interativas para os alunos (BRASIL, 2006).

Na literatura, o uso da experimentação como estratégia de ensino tem sido alvo de inúmeras pesquisas, com os pesquisadores apontando uma série de vantagens e ressalvas para o uso dessas atividades experimentais, sendo que, os professores têm apontado essas ferramentas como uma das maneiras mais eficazes de se minimizar as dificuldades encontradas para o ensino da Física de modo significativo (ARAÚJO; ABIB, 2003). Por isso, propõem-se a utilização de simulações computacionais por parte do docente para demonstração dos conceitos físicos ligados à disciplina de mecânica dos fluidos de modo mais dinâmico, oferecendo um ambiente virtual prático, seguro e flexível. Essas ferramentas computacionais permitem o estudo de situações que seriam difíceis ou inviáveis nas práticas laboratoriais, permitindo uma abordagem diferente das tradicionais forma de ensino, acrescentado do apoio de aulas expositivas e embasamento da bibliografia.

Uma dessas ferramentas didáticas são as simulações interativas *PhET* da Universidade do Colorado em Boulder que fornecem um ambiente virtual de aprendizado com uma variedade de simulações demonstrando aplicações de leis, de conceitos e de fenômenos nos campos da física, da química e etc (PHET INTERACTIVE SIMULATIONS, 2023). No *PhET* está disponível uma simulação de aplicação da equação de Bernoulli intitulada “Pressão do fluido e fluxo” onde o usuário altera o diâmetro de uma tubulação e visualiza as variações de pressão e velocidade que esse efeito provoca.

Impulsionado por essa simulação, que devido a sua simplicidade limita as possibilidades de customização do experimento, propõem-se a utilização de outras ferramentas de código aberto que permitam ao usuário maior controle da simulação permitindo assim o contato do estudante com soluções numéricas de escoamento de fluidos. O *OpenFOAM* é uma ferramenta de Dinâmica dos Fluidos Computacional de grande relevância no cenário de simulações computacionais com uma curva de aprendizado contínua, sendo multidisciplinar, com aplicações em diversos estudos e podendo substituir uma série de ferramenta comerciais consolidadas como o ANSYS e o COMSOL (OPENFOAM, 2023).

Este estudo tem como objetivo principal analisar os campos de pressão e velocidade num escoamento interno de um fluido incompressível dentro de uma tubulação de diâmetros variáveis, por meio da Fluidodinâmica Computacional utilizando o software gratuito de código aberto *OpenFOAM*, comparando os resultados obtidos com as variações esperadas de pressão e de velocidade segundo o teorema de Bernoulli. Como objetivos secundários se tem a visualização dos perfis de velocidade nas seções do

escoamento com diferentes diâmetros, além de apresentar a equação de Bernoulli para regime estacionário de fluidos incompressíveis se atentando para as regiões do escoamento em que ela é válida e as situações em que não é possível aplicá-la.

2. Fundamentação Teórica

A Dinâmica dos Fluidos Computacional do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD) é uma área que utiliza um arranjo de esquemas numéricos para realizar simulações de fenômenos relacionados a fluidos como escoamentos internos, escoamento sobre superfícies, transferência de calor entre corpos e etc. Portanto, foi utilizado o método numérico para obter uma solução aproximada da solução analítica, solução esta que, devido à complexidade das equações de governo dos fluidos, é encontrada muitas vezes em problemas simplificados de geometrias simples. Contudo, a modelagem computacional pode ser aplicada a uma grande variedade de problemas, permitindo o estudo de casos complexos e eliminando as desvantagens das soluções analíticas e da experimentação empírica.

Um dos desafios para o uso dessas ferramentas computacionais é garantir que os resultados numéricos obtidos concordem com os resultados analíticos, ou seja, confirmar que, para um conjunto de entradas conhecido, o resultado esperado é retornado. O desafio é maior para modelos de maior complexidade. Para isso, um dos meios de verificar a correta utilização da ferramenta CFD é a comparação inicial com um modelo analítico (livro didático) replicando a sua configuração e condições iniciais e de contorno para o software. Se ambos os resultados corresponderem, podemos desenvolver essa linha de base, adicionando complexidade gradativamente, para verificar funcionalidades adicionais do software. Podendo desse jeito, avançar para o estudo de casos de teste complexos de tal forma que se torna impraticável a solução analítica.

2.1 Equações Governantes

Os fluidos são governados por equações diferenciais parciais que representam as leis de conservação da massa, conservação de quantidade de movimento e conservação de energia. Segundo White (2011), a forma geral da equação de conservação de massa é apresentada na equação 1, sendo u o vetor velocidade, compostas pelas componentes em x , y e z dependendo do caso 2D ou 3D e ρ a densidade do fluido, dada em kg/m^3 :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

A equação de conservação de quantidade de movimento na forma vetorial para fluidos incompressíveis é apresentada na equação 2, sendo \vec{g} o vetor aceleração da gravidade e σ_{ij} o tensor tensão com nove componentes, sendo necessário escrever essas componentes por meio de equações constitutivas em termos do campo de velocidade e do campo de pressão (WHITE, 2011).

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = \rho \vec{g} + \nabla \cdot \sigma_{ij} \quad (2)$$

Contudo, nesse estudo estamos considerando um fluido newtoniano, incompressível, em regime estacionário e sem transferência de calor. Com essas condições, as Equações 1 e 2 podem ser simplificadas nas Equações 3 e 4, respectivamente. Juntas, as equações de conservação de massa e conservação de quantidade de movimento são os requisitos para que o software livre *OpenFOAM* defina os campos de velocidade e pressão do determinado problema em estudo.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (4)$$

2.2 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli é uma relação aproximada entre pressão, velocidade e altura de pontos do fluido em um escoamento, válida em escoamentos de regime permanente em regiões que os efeitos viscosos são desprezíveis em comparação aos efeitos da inércia, da gravidade e da pressão (ÇENGEL; CIMBALA, 2017). A equação é deduzida por meio da aplicação da segunda lei de Newton, conservação do momento linear, a uma partícula do fluido numa linha de corrente.

Foge ao objetivo deste trabalho mostrar essa dedução, a equação afirma que, num escoamento incompressível em regime permanente ao longo de uma linha de corrente nas regiões do escoamento sem viscosidade é válida a relação explicitada na Equação 5, sendo P a pressão estática de uma partícula do fluido, dada em Pascal (N/m²), v a velocidade de uma partícula do fluido, dada em m/s, g o módulo da aceleração da gravidade, dada em m/s² e h a distância vertical em relação a um referencial dada em m.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gh = \text{constante} \quad (5)$$

Existem outras formas da equação de Bernoulli que se aplicam a escoamentos em regime transiente e escoamentos compressíveis, contudo, a equação de Bernoulli continua não se aplicando em seções do escoamento que envolva bombas hidráulicas, turbinas, escoamento muito próximo de superfícies sólidas (regiões de camada limite), escoamento em estreitas passagens e escoamento na região a jusante de objetos (ÇENGEL; CIMBALA, 2017).

Nessas regiões onde a viscosidade não pode ser desprezada há dissipação de energia mecânica, devido ao atrito. Nesse sentido, a equação de Bernoulli pode ser vista como uma equação de conservação das formas de energia mecânica, reconhecendo os termos da equação 5: $V^2/2$ como sendo a energia cinética por unidade de massa (J/kg), $g \cdot h$ como sendo a energia potencial gravitacional por unidade de massa (J/kg) e P/ρ como sendo a energia de escoamento por unidade de massa (J/kg). Portanto, a equação anuncia que durante o escoamento em regime permanente, as formas de energia mecânica são convertidas entre si de forma que sua soma permaneça constante, contando que o atrito seja desprezível e com isso não haja conversão de energia mecânica em energia térmica.

Em escoamentos internos, a condição de não escorregamento do fluido, que afirma que as partículas do fluido na camada imediatamente em contato com uma superfície devem assumir a mesma velocidade da superfície, impõe um gradiente de velocidade ao longo do duto. O perfil de velocidade em escoamentos em dutos é caracterizado por uma velocidade nula do fluido nas paredes e um aumento gradual nas camadas adjacentes no fluido com velocidade máxima na seção média do duto. Quando o escoamento é laminar o perfil de velocidade desenvolvido é parabólico, para escoamento turbulento o perfil se torna mais achatado e com queda brusca próxima à parede (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2011).

2.3 Perda de Carga do Escoamento

Queda de pressão é um fenômeno relacionado aos requisitos para manter o escoamento num duto, sendo que a queda de pressão e a perda de carga dependem da tensão de cisalhamento na parede (MUNSON, YOUNG, OKIISHI, 2004). Para escoamentos

incompressíveis em tubos horizontais com diâmetro constante, a queda de pressão é calculada por:

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho v_{med}^2}{2} \quad (6)$$

Sendo, f o fator de atrito de Darcy ou coeficiente de resistência de Darcy-Weisbach - um parâmetro adimensional cujo valor depende do número de Reynolds para o fluxo e do grau de rugosidade da superfície - , L o comprimento do tubo, dada em m, D o diâmetro do tubo, dada em m e v_{med} a velocidade média do fluido, dada em m/s.

Normalmente, as perdas de pressão são expressas em termos de perdas de carga h_L tal que, $h_L = \Delta P / \rho \cdot g$, a perda de carga representa a “altura adicional à qual o fluido precisa ser elevado por uma bomba para superar as perdas por atrito do tubo” (ÇENGEL; CIMBALA, p.285, 2017). Além disso, a inserção de componentes adicionais, além dos trechos de condutos retos, contribui para perdas de carga adicionais no sistema, geralmente chamadas de perdas menores, entretanto em alguns casos essas perdas adicionais podem ser maiores do que as perdas normais (PORTO, 2006).

Essas perdas menores são expressas em termos do coeficiente de perda, K_L , determinado experimentalmente, em geral pelos próprios fabricantes. Esse coeficiente depende da geometria do componente adicional e do número de Reynolds que é parâmetro adimensional de proporção entre as forças inerciais e as forças viscosas em um escoamento e é utilizado para determinar se o escoamento será laminar ou turbulento.

$$K_L = \frac{2\Delta P}{\rho v^2} = \frac{2gh_L}{v^2} \quad (7)$$

Um tipo comum de transição encontrada nos sistemas de dutos são as expansões e contrações graduais, essas possuem coeficiente de perda em função da razão entre as áreas de diâmetros diferentes e entre o ângulo θ formado, valores estes encontrados na literatura, a depender da geometria o coeficiente de perda pode variar de 0,8 a 0,004 para superfícies bem arredondadas (MUNSON, YOUNG, OKIISHI, 2004).

Ademais, em regiões de contrações – redução da área do escoamento – existe a possibilidade de encontrar o fenômeno de *vena contracta*, que ocorre quando fluxo não acompanha a mudança de direção resultando numa separação do escoamento nos cantos do duto, reduzindo ainda mais a área efetiva do escoamento. A velocidade aumenta na região de contração da seção e a pressão diminui devido à redução da área efetiva do escoamento, em conformidade com o exposto na equação de Bernoulli. Em seguida diminui à medida que o escoamento retorna a preencher toda a tubulação, contudo, apesar de, segundo Bernoulli, se esperar que o fluido desacelere convertendo a energia cinética totalmente em pressão, o que ocorre empiricamente é que parte da energia é perdida pela dissipação viscosa de modo que a pressão do fluido não retorna aos valores esperados (MUNSON, YOUNG, OKIISHI, 2004).

3. Metodologia

Para o estudo foi realizada uma modelagem computacional, composta de três etapas: pré-processamento, processamento e pós-processamento, utilizando o software livre *OpenFOAM* para modelagem CFD. Nele as equações de governo foram discretizadas pelo Método dos Volumes Finitos que consiste em decompor o domínio do problema em pequenos volumes de controle, em seguida as equações diferenciais são integradas sobre cada um desses volumes. As integrais de volumes são transformadas em integrais de superfície por meio do teorema da divergência, as variáveis de interesse são

armazenadas nos centros das células e a interpolação é usada para aproximar os fluxos no centróide das faces entre dois volumes de controle (MALISKA, 2014).

3.1 Pré-processamento

É a etapa que consiste na representação computacional do fenômeno físico a ser estudado, nessa etapa, é realizada a discretização do domínio de interesse com a construção do modelo geométrico adequado e a geração da malha computacional com o devido refinamento respeitando o custo computacional, além da correta definição das condições iniciais e de contorno do problema.

Para essa etapa foi utilizado o software externo *Gmsh*, nele é possível a criação de geometrias por meio da interface gráfica do usuário ou então por meio de arquivos de texto escritos na própria linguagem de *script* do *Gmsh* ou em outras linguagens de programação como o *Python*. A escolha desse software se deve, entre outros fatores, pela liberdade dada ao usuário para escolha da quantidade de divisões em cada linha da superfície para a criação da malha. É uma etapa de extrema importância para a obtenção de resultados precisos que descrevam de maneira adequada os fenômenos físicos do escoamento estudado, a má representação das condições iniciais do problema acarreta soluções numéricas errôneas.

Conforme a Figura 1, construída no *Gmsh*, com intuito de reduzir os custos computacionais, foi gerado um modelo bidimensional simplificado representando uma tubulação de 4,3 m de comprimento, com diâmetro variável. Inicialmente, a tubulação apresenta diâmetro de 0,3 m por uma distância de 1 m, em seguida sofre uma contração gradual de 0,1 m de comprimento reduzindo o diâmetro da tubulação em 0,05359 m, segue por uma distância de 1 m, em seguida sofre outra contração gradual de mesmas dimensões e termina com uma seção de 0,1928 m de diâmetro e 2,1 m de comprimento.

Na Figura 1a é apresentado o modelo construído e posteriormente utilizado no *OpenFOAM*. Foram definidas quatro regiões do domínio: entrada, saída, duto e frente_e_verso. Com condições de parede para a região duto, condições do tipo “empty” para a região de frente_e_verso e condições de fluxo livre para as regiões de entrada e saída. O *OpenFOAM* trabalha apenas com modelos tridimensionais, contudo é possível que o estudo seja feito de maneira bidimensional, basta que uma das direções do espaço seja de tamanho desprezível e posteriormente sejam atribuídas condições de contorno do tipo “empty” para essa direção do espaço.

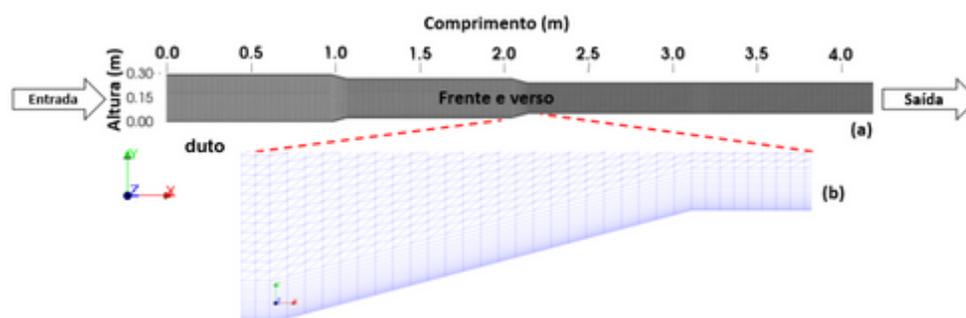


Figura 1 – (a) Modelo CAD do domínio utilizado para a simulação. (b) Malha computacional e camada de inflação utilizada.

A malha gerada é estruturada por blocos composta por prismas nas regiões afastadas das paredes da tubulação e uma camada de inflação – uma camada de malha estruturada composta de hexaedros com uma taxa de crescimento geométrico que reduz o volume da célula à medida que se aproxima da parede – esse refinamento da malha nas paredes do

escoamento é necessário para visualização da camada limite, região onde se espera um elevado gradiente nas variáveis do escoamento. A região de refino na malha, próxima às paredes do escoamento, pode ser observada na Figura 1b.

Na Tabela 1 encontram-se informações características do domínio computacional e parâmetros de qualidade da malha como a razão de aspecto, a distorção, a não-ortogonalidade entre outros, obtidas no *OpenFOAM* por meio do utilitário “*checkMesh*”. Todos os parâmetros de malha analisados estão abaixo do limite máximo padrão aceitável pelo software de processamento utilizado.

Tabela 1- Características da malha gerada.

Número total de células	311928
Número de células hexaédricas	60864
Número de células prismáticas	251064
Razão de aspecto máximo	104.167
Não ortogonalidade da malha máxima	56.8437
Não ortogonalidade da malha média	25.7081
Distorção máxima	0.333333

Fonte: Os Autores (2023).

A razão de aspecto é a razão entre a largura máxima e a mínima de um volume de controle da malha, sendo que o ideal é um valor o mais próximo possível de 1, para o *OpenFOAM* o valor máximo padrão é 1000. A não-ortogonalidade é definida como o ângulo formado pelo vetor área da face entre dois volumes de controle vizinhos e o vetor que conecta o centro desses volumes, quanto menor esse valor menor as chances de erro numérico, no *OpenFOAM* o limite padrão é de 70 graus. Por fim, a distorção ou assimetria é a distância entre o vetor que conecta o centro dos volumes vizinhos e o centro da face entre esses dois volumes, quanto mais próximo de zero melhor, tendo um limite padrão de 4 no *OpenFOAM*.

3.2 Processamento

Para a etapa do processamento foi utilizado o *OpenFOAM*, que conta com uma variedade de solucionadores para vários tipos de escoamento, cabe ao usuário escolher o solucionador específico para uma classe de problemas a serem resolvidos. O solucionador é usado para resolver as equações de governo utilizando o método dos volumes finitos, para esse estudo foi usado o solucionador de estado estacionário, *SimpleFoam*, para escoamentos incompressíveis e turbulentos, contendo o modelo de turbulência *K-omega*.

Devem ser atribuídas condições de contorno para cada uma das superfícies do domínio definidas na malha, os valores estão apresentados na Tabela 2. No solucionador utilizado, *SimpleFoam*, devem ser atribuídas condições para os seguintes grandezas: k (energia cinética turbulenta dada em m^2/s^2), ν_t (viscosidade turbulenta dada em m^2/s), ω (taxa de dissipação específica de turbulência dada em s^{-1}), p (pressão cinemática – definida como a pressão estática sobre a densidade do fluido – dada em m^2/s^2) e U (velocidade dada em m/s). Foram definidos os valores de $1 \times 10^{-5} m^2/s$ para a viscosidade cinemática – valor baixo com intuito de reduzir as perdas de energia por dissipação –, $0,1 m/s$ para a velocidade de entrada no escoamento, $1 kg/m^3$ para a densidade do fluido e para a pressão cinemática foi definido uma condição de campo interno uniforme com valor zero.

Tabela 2 - Condições de contorno para simulações 2D.

	frente_e_verso	entrada	saída	duto
k (m^2/s^2)	empty	FixedValue value uniform 0,375 ⁻⁴	zeroGradient	kqRWallFunction value uniform 0,375 ⁻⁴
ν_{t} (m^2/s)	empty	Calculated value uniform 0	Calculated value uniform 0	nutkWallFunction value uniform 0
ω (s^{-1})	empty	FixedValue value uniform 0,1065	zeroGradient	OmegaWallFunction value uniform 0,1065
p (m^2/s^2)	empty	zeroGradient	FixedValue value uniform 0	zeroGradient
U (m/s)	empty	FixedValue (0,1 0 0)	zeroGradient	FixedValue (0 0 0)

Fonte: Os Autores (2023).

4. Resultados e Discussões

A última etapa da análise CFD é o pós-processamento caracterizado pela visualização e análise dos resultados obtidos na etapa de processamento, para isso foi utilizado o software de código aberto *Paraview*, nele foi possível obter as figuras e gráficos a serem apresentados.

Abaixo, na Figura 3 são apresentados os resultados do campo de velocidade do escoamento na tubulação. Os resultados para o campo de velocidade condizem com o descrito na literatura, respeitando a equação de continuidade o fluido acelera em regiões de menor diâmetro para manter a vazão do escoamento. Esse fenômeno é representado pela derivada positiva da velocidade no eixo x nas regiões de contração, sinalizando o aumento do módulo da velocidade, diferente das regiões de diâmetro constante onde se espera a manutenção do módulo da velocidade no eixo x, ou seja, espera-se que a derivada da velocidade no eixo x seja nula.

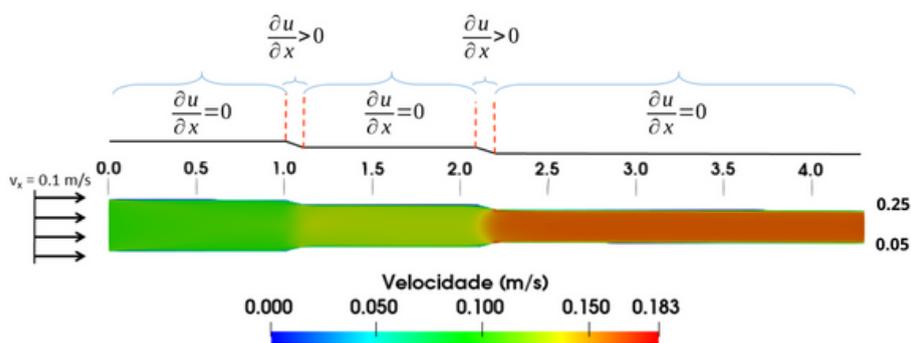


Figura 3 – Campo de velocidade na tubulação.

Juntamente, é exposto na Figura 4 o gráfico de velocidade na linha de corrente do centro da tubulação, os pontos mais afastados das paredes da tubulação (regiões de camada limite do escoamento) e mais centrais do escoamento, sendo assim, a região que menos sofre os efeitos da viscosidade. Nota-se que há um aumento no valor da velocidade no começo do escoamento, com o duto apresentando diâmetro constante, esse fato decorre da condição de contorno especificada na região de entrada. Ao prescrever a condição de velocidade uniforme, o perfil de velocidade não se encontra desenvolvido, como

resultado, forma-se um gradiente de velocidade no eixo y no tubo aumentando a velocidade do fluido na seção média do tubo. Além disso, percebe-se que após a primeira contração gradual há um leve pico no gráfico sinalizando assim a formação de uma *vena contracta* no escoamento, ou seja, uma região de estreitamento das linhas de corrente do fluido após uma redução súbita da largura do duto de escoamento.

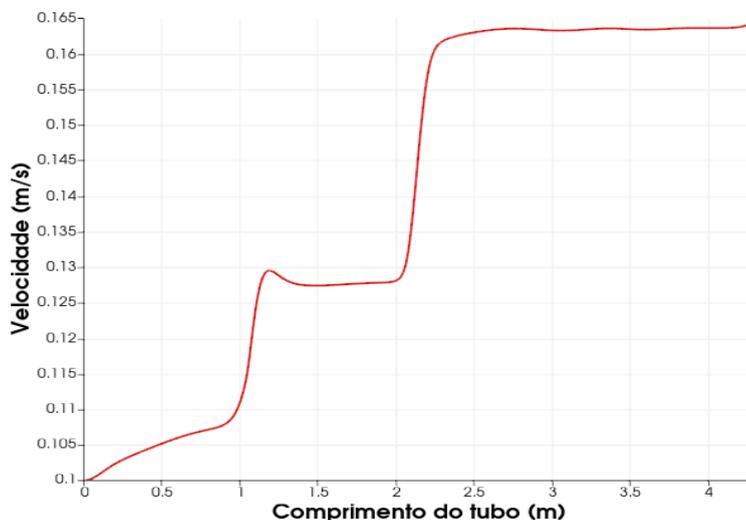


Figura 4 – Gráfico de velocidade ao longo da linha de corrente no centro da tubulação.

Ademais, na Figura 5 pode-se observar o perfil de velocidade nas três seções do escoamento com diâmetros diferentes: 0,3 m de diâmetro (a), 0,2464 m de diâmetro (b) e 0,1928 m de diâmetro (c). O perfil encontrado é característico de escoamentos turbulentos, com valores elevados de Reynolds, devido aos valores de velocidade mais uniformes no centro e a queda brusca de velocidade nas paredes do duto.

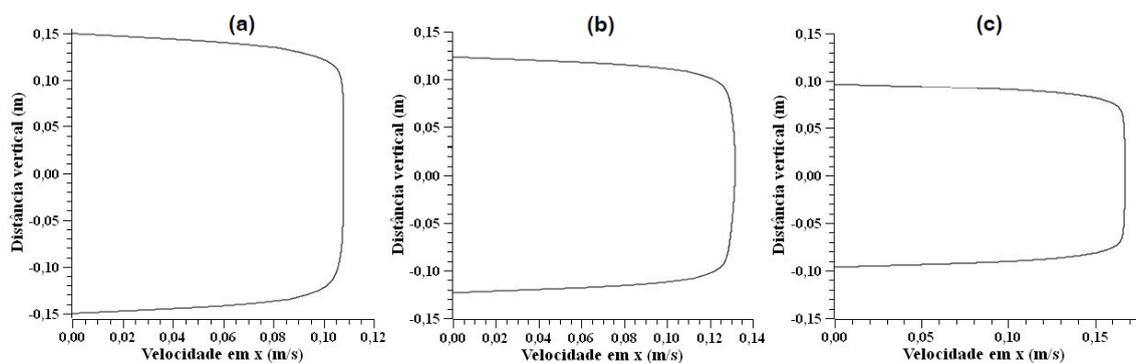


Figura 5 – perfil de velocidade nas três seções do escoamento. 0,3 m de diâmetro (a). 0,2464 m de diâmetro (b). 0,1928 m de diâmetro (c).

Na Figura 6 podem-se observar os resultados do campo de pressão cinemática do escoamento na tubulação. Os resultados concordam com a relação descrita na Equação 5, a pressão do escoamento varia inversamente proporcional à velocidade para manter o balanço de conservação das formas de energia mecânica durante o escoamento. À medida que a energia cinética aumenta nas áreas de contração, a energia de escoamento associada a pressão do fluido diminui. Portanto, o resultado esperado na literatura são áreas com valores negativos para a derivada da pressão no eixo x nas regiões de contração e valor constante da pressão nas regiões de diâmetro constante, derivada da pressão no eixo x nula.

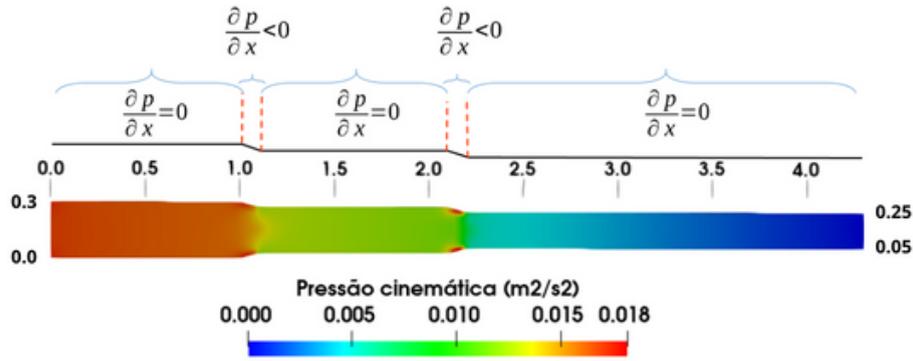


Figura 6 – Campo de pressão cinemática na tubulação.

Abaixo, a figura 7 apresenta o gráfico de pressão cinemática na linha de corrente do centro da tubulação, todos os pontos do gráfico estão na mesma altura.. Percebe-se, o constante declínio dos valores de pressão ao longo das seções do tubo com o diâmetro constante, resultados que contrariam o esperado por Bernoulli e confirmam a perda de carga esperada em escoamentos internos, fenômeno crucial para o projeto eficiente de sistemas hidráulicos, não havendo assim as zonas de derivada da pressão no eixo x igual a zero.

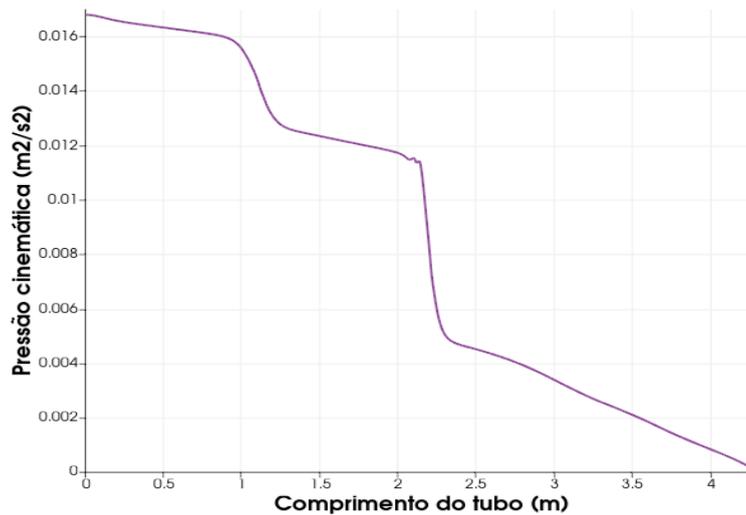


Figura 7 – Gráfico de pressão cinemática ao longo da linha de corrente no centro da tubulação.

Por fim, a Figura 8 representa a equação de Bernoulli calculada com os valores de velocidade e pressão cinemática obtidos dos pontos da linha de corrente do centro da tubulação. Para pontos de mesma elevação, na linha de corrente do centro da tubulação, a Equação 5 afirma que a soma da pressão cinemática com o quadrado da velocidade sobre dois é um valor constante. No gráfico, percebemos que essa afirmação não foi válida, apesar dos esforços em diminuir o valor da viscosidade cinemática para reduzir as perdas de energia pela dissipação viscosa. Sendo assim, percebe-se que houve uma perda no balanço de energia mecânica durante o escoamento. Atribuímos essa queda constante às perdas de carga do escoamento, diminuindo assim a energia de escoamento associada a pressão do fluido e alterando o balanço de conservação de energia mecânica.

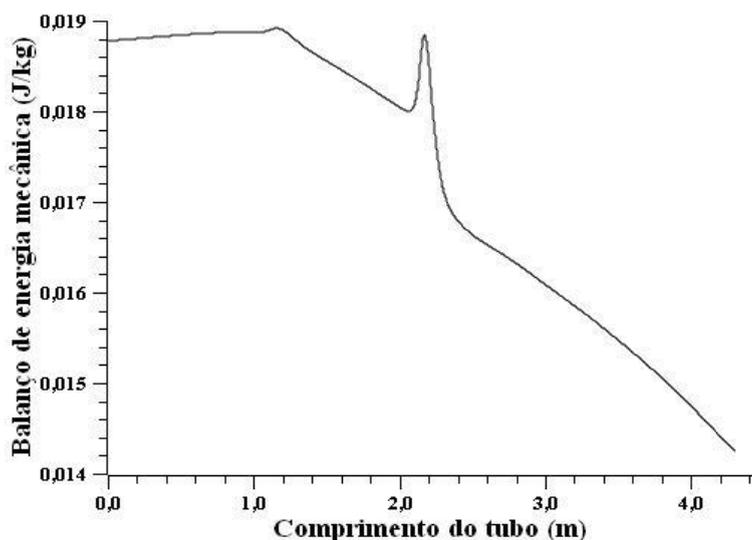


Figura 8 – Equação de Bernoulli aplicada aos pontos da linha de corrente no centro da tubulação.

Apesar da simplicidade da de Bernoulli e da variedade de aplicações práticas no estudo de escoamento de fluidos, a Figura 8 reforça a necessidade do conhecimento das limitações de seu uso, não sendo possível aplicar a equação de Bernoulli em toda a parte do escoamento, mesmo quando o fluido apresenta baixos valores de viscosidade, se mostrando uma relação aproximada entre pressão, velocidade e altura de pontos do fluido tão boa a precisão quanto as características do caso estudado permitam e da região do escoamento em que o pesquisador se tem interesse na obtenção desses resultados.

5. Considerações Finais

Foram mapeados os campos de pressão e velocidade do escoamento interno dentro de uma tubulação com diâmetros variáveis com o objetivo de visualizar a concordância dos dados obtidos com o exposto no teorema de Bernoulli para fluidos incompressíveis. Os resultados para a pressão cinemática e velocidade obtidos nos pontos da linha de corrente do centro da tubulação e aplicados na equação de Bernoulli mostram que a relação explicitada na Equação 5 não foi constante no escoamento. Esse fato entra em conformidade com as limitações da equação para escoamentos próximos de superfícies sólidas ou em dutos estreitos, sendo necessário avaliar os resultados obtidos considerando a perda de carga. Contudo, a equação se mostra efetiva para prever as variações de pressão e velocidade.

Além da importância da equação de Bernoulli como relação aproximada entre as principais variáveis associadas ao escoamento e com variadas aplicações práticas, o estudo de perda de carga se mostra relevante para a hidráulica. A compreensão desse fenômeno é crucial para dimensionar adequadamente os componentes de um sistema hidráulico e para garantir que a pressão e a vazão do fluido atendam aos requisitos desejados, minimizando a necessidade de bombas ou outros dispositivos de aumento de pressão, resultando em menor consumo de energia.

A modelagem CFD se mostra uma solução viável para estudo, sendo que a solução numérica das equações de conservação que governam o escoamento de fluidos possibilita a análise de vários casos em que não se é possível obter solução analítica e a solução experimental é inviável devido ao custo elevado ou outros empecilhos práticos que se possam ter. Apesar da viabilidade, destaca-se a importância da etapa de pré-processamento para a acurácia dos resultados obtidos, a falha no devido resgate da

Física do processo e escolha das condições de contorno pode acarretar resultados errôneos e inválidos.

Como proposta para estudos futuros, pode-se realizar a validação experimental com relação aos resultados numéricos obtidos no estudo, além de prosseguir o estudo utilizando a forma compressível da equação de Bernoulli. Alterando a característica do fluido para compressível, mudando o solucionador utilizado pelo OpenFOAM, mudando assim a equação de conservação para sua forma geral e avaliando os efeitos da variação de densidade do fluido durante o escoamento, fenômeno com aplicações na área industrial, como no transporte de gás natural e de petróleo em refinarias e em processos industriais que envolvem a transferência de gases e seu processamento.

Referências

ARAÚJO, M. S.; ABIB, M. L. V. S. Atividades experimentais no ensino de física: diferentes enfoques, diferentes finalidades. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 2, p.176-194, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/PLkjm3N5KjnXKgDsXw5Dy4R/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 08 dez. 2023.

BRASIL. Ministério da Educação: Secretaria de Educação Básica. *Orientações Curriculares para o Ensino Médio: Ciências da natureza e suas tecnologias. Volume 2.* Brasília, 2006.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. “Mecânica de Fluidos: fundamentos e aplicações”. Porto Alegre: AMGH, 2017.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A. T. “Introdução à Mecânica dos Fluidos”. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MALISKA, Clovis R., *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacionais. 2. ed.* Rio de Janeiro: LTC, 2014.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. “Fundamentos da Mecânica dos Fluidos”. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

OPENFOAM. *OpenFOAM: User Guide v2112: the open source cfd toolbox.* Disponível em: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/>. Acesso em: 08 dez. 2023.

PHET INTERACTIVE SIMULATIONS. *Simulações Interativas para Ciência e Matemática.* Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/. Acesso em: 08 dez. 2023.

PORTO, Rodrigo de Melo. *Hidráulica básica. 4. ed.* São Carlos: Eesc-Usp, 2006. 540 p.

WHITE, Frank M. *Mecânica dos fluidos. 6. ed.* Porto Alegre: AMGH, 2011.