

Simulação Computacional do escoamento em Degrau por Volumes Finitos Utilizando OpenFOAM

Paula Jaíne Alves da Silva

paulaasilva@usp.br

Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brazil

Evelise Romam Corbalan Góis Freire

evelise.freire@ufla.br

Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brazil

Resumo

O tratamento computacional tem sido frequentemente utilizado na solução de problemas de fluidodinâmica. É bastante vantajoso empregar métodos numéricos na solução das equações que modelam o problema tratado, uma vez que o tratamento analítico e/ou experimental pode se mostrar inviável por razões de complexidade custo e/ou tempo. Neste estudo, foi realizada a simulação do escoamento em um degrau, utilizando o software OpenFOAM, com o objetivo de identificar o comportamento das linhas de corrente e zonas de recirculação, que podem influenciar o escoamento em vertedouro, muito comuns em problemas ambientais. Os resultados das simulações mostraram o aparecimento de uma zona de recirculação, validada por resultados experimentais encontrados na literatura.

Palavras-chave

Fluidodinâmica computacional, Escoamento em degrau, OpenFOAM.

1 Introdução

A necessidade do estudo do movimento de fluidos se mostrou presente no cotidiano das civilizações desde os tempos mais remotos. O fato desse fenômeno físico estar presente em toda a natureza, como o movimento do vento, das correntes e marés, e da circulação sanguínea, pode ter sido a principal causa desse interesse.

Projetos como relógios de água, sistemas de distribuição de água para o consumo humano e irrigação, assim como o projeto de navios e também de

dispositivos para a guerra, como flechas e lanças, foram alguns dos problemas encontrados pelas civilizações antigas e que contribuíram para o desenvolvimento da mecânica dos fluidos. Baseados no procedimento da tentativa e erro, esses projetos foram desenvolvidos sem o uso de conceitos matemáticos ou da mecânica, já que esses estudos eram eminentemente experimentais, pois não havia ainda uma teoria física que explicasse o movimento e as propriedades dos fluidos [8].

Leonard Euler foi quem primeiro deduziu as equações de movimento de fluidos, as chamadas equações de Euler e por isso é considerado um dos fundadores da hidrodinâmica. No entanto, as descrições matemáticas do comportamento de fluidos só ganharam força no século XIX, na forma das equações de Navier-Stokes através dos trabalhos dos franceses Claude Navier e Simeon Poisson, e do inglês George Stokes [3]. A complexidade matemática dessas equações não permite que soluções analíticas sejam encontradas para casos gerais de problemas de escoamento de fluidos. Segundo Maliska [6], os métodos analíticos são aplicáveis apenas a problemas cujas hipóteses simplificativas requeridas os desviam demasiadamente do fenômeno físico real, ou em casos onde podem ser feitas algumas simplificações, como por exemplo, desprezar grandezas ou relações entre elas. Assim, métodos analíticos acabam sendo comumente utilizados no tratamento de problemas com geometrias e condições de contorno simples.

Por essa razão, o tratamento computacional de problemas envolvendo escoamento de fluidos tem sido frequentemente utilizado, visto que o tratamento teórico e/ou a experimentação física podem se mostrar inviáveis devido a incapacidade de tratar com propriedade o fenômeno físico em questão, além do elevado custo que métodos experimentais podem acarretar. Assim, resolver o problema através da simulação computacional aumenta a possibilidade de testar diferentes configurações de escoamento, reduz o tempo de execução dos testes, contribui para a melhoria das análises experimentais e ainda reduz o desperdício de protótipos experimentais em que falhas ocorreram, reduzindo impacto ambiental. O conjunto dessas ferramentas é o interesse da Fluidodinâmica Computacional, do inglês, Computational Fluid Dynamics, por isso comumente tratadas de ferramentas CFD.

De acordo com Filho [2], o escoamento interno sobre degrau é histórica-

mente um dos problemas da engenharia mais extensivamente estudados, tanto de forma experimental como numérica. Entretanto, segundo Arantes [1], estudos por simuladores numéricos são mais escassos na literatura. Mesmo tendo geometria simples e de fácil reprodução, o estudo deste escoamento é incentivado por fenômenos físicos de grande influência na eficiência de processos envolvendo transferência de calor e massa, com amplas aplicações em hidráulica. Um exemplo dessas aplicações são os vertedouros em degrau, que são estruturas hidráulicas utilizadas para proteção de barragens de retenção de água que liberam os excedentes do reservatório quando sua capacidade máxima é atingida. A função dos degraus é dissipar parte da energia cinética do escoamento durante a queda de água evitando erosões na estrutura do barramento e os possíveis danos que ocorreriam se houvesse o seu rompimento, como por exemplo, inundações. Além disso, o perfil dissipativo do degrau acarreta uma redução significativa do tamanho e dos custos das bacias de dissipação, cujo dimensionamento depende diretamente da capacidade prévia de dissipar energia que o vertedouro apresenta. Para o estudo computacional deste problema foi considerado um fluido newtoniano, com escoamento unidimensional, incompressível, laminar (Número de Reynolds $Re = 24$), de regime transiente e com velocidade de entrada igual a $0,1\text{ m/s}$.

Neste estudo, são descritos os aspectos físicos de um escoamento em degrau, juntamente dos aspectos matemáticos das equações de Navier-Stokes que o modelam. Para a execução das simulações do escoamento no degrau, foi utilizado o software livre OpenFOAM. As simulações foram detalhadas através do Método de Volumes Finitos, implementado no ambiente OpenFOAM para a solução das equações que modelam o problema tratado. Além do estudo das linhas de corrente e identificação de zonas de recirculação, foram analisadas as particularidades, vantagens e desvantagens dessa ferramenta, bem como sua viabilidade, em relação aos problemas de escoamento de fluidos.

2 Metodologia

2.1 Método de Volumes Finitos

O escoamento em degrau pode ser modelado pelas Equações de Navier-Stokes, que são Equações Diferenciais Parciais (EDP) não lineares e que não apresentam solução analítica. O tratamento numérico de uma EDP só é possível quando estas são expressas na forma de operações aritméticas que o computador possa executar, ou seja, através de uma análise discreta. Assim, a tarefa do método numérico consiste em substituir o operador diferencial existente na EDP por expressões algébricas que envolvem a função incógnita, escritas em função dos pontos da malha, ou seja, discretizar a EDP. Essas expressões podem ser manipuladas pelo computador, relacionando entre si os valores das grandezas nos pontos discretos (malha) do domínio da região de interesse. Por permitir uma interpretação física direta das equações e possibilitar sua aplicação diretamente sobre a malha computacional, o Método dos Volumes Finitos (MVF) é o método numérico mais utilizado na solução de problemas envolvendo escoamento de fluidos. O MVF consiste em um procedimento para obtenção de uma versão discreta da EDP através da integração dessa equação em uma região ou volume do espaço. O ponto de partida do método é a decomposição do domínio em pequenos volumes de controle (VC). No centróide de cada volume de controle localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis. Assim, os valores das variáveis nas superfícies dos VC são obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC). A Figura 1 de Hurtado [5], mostra os entes geométricos associados ao processo de discretização do Método de Volumes Finitos.

Depois de ter definido os VC, as equações de conservação (equações governantes do escoamento) são descritas em sua forma integral para cada volume. Então, o Teorema da Divergência de Gauss é aplicado para converter integrais de volume sobre operadores de divergência e gradiente às integrais de superfície. Obtidas as integrais de superfície, estas são aproximadas usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada VC, na qual aparecem os valores das variáveis no nó em questão e nos nós

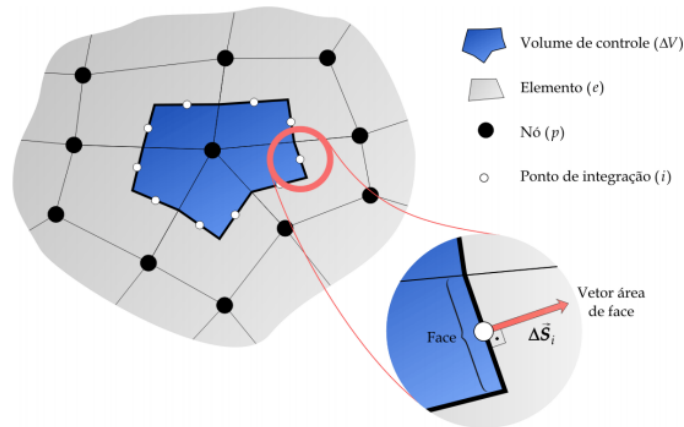


Figura 1: Entes geométricos associados ao processo de discretização.
 Fonte: [5].

vizinhos. Esse conjunto de equações irá gerar um sistema de equações que é então resolvido através de métodos segregados ou acoplados.

A grande vantagem do MVF é que ele pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, que define apenas as fronteiras do volume de controle e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas. Assim, este método não fica limitado à geometria do domínio do escoamento, que pode se mostrar bastante complexa nos problemas da engenharia, que por sua vez podem, assim, necessitar de malhas muito elaboradas.

2.2 Formulação das equações governantes

Os problemas de fluidodinâmica são modelados matematicamente através de um conjunto de EDPs formuladas a partir dos princípios de conservação de: massa, momento e energia, e utilizando leis constitutivas, para cada propriedade de interesse.

Cada equação governante emprega uma certa grandeza física como sua variável dependente, e define que deve haver um balanço entre os vários fatores que influenciam esta grandeza. Estas variáveis dependentes representam a densidade no caso da equação governante da massa, a velocidade nas equações de conservação de momento e a temperatura na equação governante da energia [2].

O processo de formulação da equação de conservação de massa para um volume de controle infinitesimal é descrito a seguir. As equações de conservação de momento e energia podem ser obtidas através de processos similares que podem ser encontrados no trabalho de Holzmann [4].

Considere a massa através de um pequeno elemento de volume de controle dV (Figura 2), em que u_x , u_y e u_z são vetores de velocidade normais às superfícies nas direções x , y , e z , respectivamente. Assim, temos que:

- Massa que entra na direção x : $(\rho u_x)|_x \Delta y \Delta z$
- Massa que sai na direção x : $(\rho u_x)|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z$
- Massa que entra na direção y : $(\rho u_y)|_y \Delta x \Delta z$
- Massa que sai na direção y : $(\rho u_y)|_{y+\Delta y} \Delta x \Delta z$
- Massa que entra na direção z : $(\rho u_z)|_z \Delta x \Delta y$
- Massa que sai na direção z : $(\rho u_z)|_{z+\Delta z} \Delta x \Delta y$

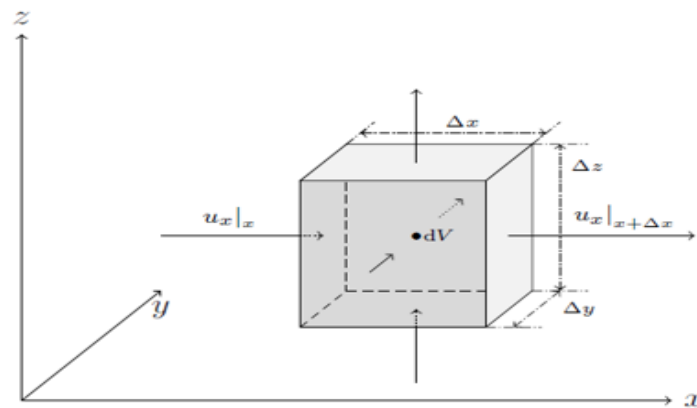


Figura 2: Balanço de massa para um volume de controle dV
 Fonte: Holzmann, 2017 [4].

A taxa de massa que entra ou sai do elemento de volume através da superfície é chamada fluxo de massa e é simplesmente a densidade vezes a velocidade com

relação à área da face. De acordo com o princípio de conservação de massa, e considerando que a massa não seja transformada em energia ou vice-versa, temos que a massa que entra e a massa que sai do volume de controle, através de suas superfícies, devem ser iguais. Além disso, a taxa de acumulação de massa também deve ser considerada.

Se tratando de um fluido compressível, a taxa de variação da densidade está relacionada com o volume e só mudará em relação ao tempo. Portanto, podemos escrever a taxa de variação da densidade como:

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} \tag{1}$$

Reescrevendo a equação 1 usando as expressões de fluxo de massa (Figura 2) nas direções x , y e z temos:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\rho}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = & ((\rho u_x)|_x - (\rho u_x)|_{x+\Delta x}) \Delta y \Delta z \\ & + ((\rho u_y)|_y - (\rho u_y)|_{y+\Delta y}) \Delta x \Delta z + ((\rho u_z)|_z - (\rho u_z)|_{z+\Delta z}) \Delta x \Delta y \end{aligned} \tag{2}$$

Dividindo a equação 2 por $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$ obtemos,

$$\begin{aligned} \frac{\partial\rho}{\partial t} = & \frac{(\rho u_x)|_x - (\rho u_x)|_{x+\Delta x}}{\Delta x} + \frac{(\rho u_y)|_y - (\rho u_y)|_{y+\Delta y}}{\Delta y} \\ & + \frac{(\rho u_z)|_z - (\rho u_z)|_{z+\Delta z}}{\Delta z} \end{aligned} \tag{3}$$

Introduzindo a suposição de um elemento de volume pequeno infinitesimal, ou seja, diminuindo as distâncias entre os cantos dos volumes de controles, temos que Δ tende à zero:

$$\frac{\Delta}{\Delta x} \longrightarrow \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta}{\Delta x} = \frac{\partial}{\partial x} \tag{4}$$

e considerando um pequeno intervalo de tempo infinitesimal, temos que:

$$\frac{\Delta}{\Delta t} \longrightarrow \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta}{\Delta t} = \frac{\partial}{\partial t} \quad (5)$$

Podemos, então, transformar a equação de diferenças finitas 3 em uma equação diferencial parcial. Assim, segue que:

$$\frac{(\rho u_x)|_x - (\rho u_x)|_{x+\Delta x}}{\Delta x} = \frac{-\Delta(\rho u_x)}{\Delta x} \longrightarrow -\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) \quad (6)$$

$$\frac{(\rho u_y)|_y - (\rho u_y)|_{y+\Delta y}}{\Delta y} = \frac{-\Delta(\rho u_y)}{\Delta y} \longrightarrow -\frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) \quad (7)$$

$$\frac{(\rho u_z)|_z - (\rho u_z)|_{z+\Delta z}}{\Delta z} = \frac{-\Delta(\rho u_z)}{\Delta z} \longrightarrow -\frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z) \quad (8)$$

Portanto, temos que a equação de conservação de massa (equação da continuidade) para um elemento de volume de controle dV é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}(\rho u_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho u_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho u_z)\right) \quad (9)$$

Se usarmos o operador ∇ e o vetor de velocidade U , a equação 9 pode ser escrita em notação vetorial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \bullet (\rho U) \quad (10)$$

No caso de fluidos incompressíveis, temos que a densidade é considerada constante. Assim, a derivada do tempo desaparecerá, pois a densidade não mudará com relação ao tempo. Conseqüentemente, se assumirmos que a densidade é constante, não há expansão ou compressão e, portanto, a derivada do tempo pode ser cancelada para zero. Logo, apenas a quantidade de massa que entra e sai do elemento deve ser levada em consideração.

2.3 OpenFOAM

A aquisição e manutenção de licenças de pacotes CFD comerciais são de alto custo, podendo não ser acessíveis ao meio acadêmico ou para pequenas empresas. Segundo Ansoni (2015, p.42) para um cluster com seis nós e 12 processadores cada, os custos de uma licença de um pacote comercial pode alcançar os noventa mil reais. Além disso, a falta de detalhes disponibilizados para o usuário na implementação dos códigos pode acarretar a utilização inadequada das rotinas nas simulações, gerando resultados insatisfatórios e uma grande dificuldade no ajuste do modelo. Assim, ferramentas livres, como o OpenFOAM, são de grande interesse nos estudos de CFD.

O OpenFOAM é uma ferramenta gratuita de CFD baseada em um conjunto eficiente e flexível de módulos em C++, capaz de operar e manipular campos tensoriais de problemas de fluidodinâmica. O pacote é constituído por diretórios que contém um conjunto de arquivos que armazenam as informações necessárias para realizar uma simulação. Esses arquivos possuem informações como a descrição da geometria, detalhes da malha, condições de contorno, parâmetros para os métodos numéricos e as propriedades físicas do problema. Além das ferramentas para simulação, O OpenFOAM possui ferramentas de geração de malha e visualização de dados incorporadas ao pacote, e também modelos para escoamentos bidimensionais ou tridimensionais, turbulentos e laminares, compressíveis e incompressíveis de fluidos newtonianos e não-newtonianos, em regime permanente ou transiente, podendo abordar uma ampla faixa de problemas da engenharia.

Por tratar-se de um ambiente totalmente livre, o OpenFOAM possibilita ao usuário acessar ao código fonte e alterar os códigos existentes, ou criar novas rotinas. Assim, é possível adequar melhor os modelos do pacote ao problema em questão, que então pode ser melhor interpretado pelo usuário mais autônomo, obtendo-se um melhor resultado da simulação. Por se tratar de um software aberto e sem uma interface gráfica intuitiva de fácil manipulação, o OpenFOAM requer um tempo maior de aprendizagem comparado aos pacotes comerciais. Entretanto, uma vasta comunidade de usuários desenvolvedores foi estabelecida em fóruns online, onde são discutidos aspectos de uso, implementação de códigos e análise numérica do software. Essa troca de informações facilita o processo de

familiarização com o OpenFOAM e a operacionalização de cada usuário. Atualmente o OpenFOAM é mantido pela ESI Group e distribuído pela OpenFOAM Foundation através do site <https://www.openfoam.com/>.

2.3.1 Pré-processamento

A etapa de pré-processamento consiste basicamente na criação de uma geometria detalhada e de uma malha representativa, que forneçam resultados com uma precisão adequada dentro de um tempo de simulação aceitável.

Como salientado por Fortuna [3], a distribuição adequada dos pontos do domínio é fundamental para se obter uma solução numérica representativa do escoamento. Logo, quanto maior for o número de pontos, isto é, quanto mais fina for a malha computacional, maior será a paridade entre modelo e os resultados numéricos obtidos através deste. No entanto, o esforço computacional exigido também será maior. Se tratando de CFD, normalmente busca-se uma solução numérica independente da malha, isto é, que não se altera dentro de algum critério de tolerância quando a malha computacional é refinada.

Para a criação da geometria do degrau foi utilizado o software FreeCAD e para geração da malha foi utilizado o software Gmsh, ambos livres e gratuitos. Os softwares estão disponíveis para download nos endereços: www.gmsh.info e www.freecadweb.org. Essa escolha se deu pela maior facilidade e menor complexidade de uso que estes ambientes apresentaram, quando comparados a outras ferramentas livres acopladas ao OpenFOAM.

O escoamento de vertedouros em degraus é comumente externo. Entretanto, como uma estratégia de simplificação, optou-se por utilizar a geometria de degrau confinado, em que o escoamento é interno ao degrau. Esta simplificação não altera a aplicabilidade dos resultados ao considerar o problema real do escoamento em um vertedouro. O degrau gerado para esta simulação possui $0,6m$ de altura, $0,9m$ de largura e inclinação de 90° . Essa escolha foi feita baseada nas medidas do vertedouro de Arkanian [7]. De acordo com Arantes [1], existem projetos com degraus de até $1,8m$, mas a melhor eficiência se dá com degraus em torno de $0,6m$. Outras medidas e algumas especificações da geometria podem ser vistas na Figura 3.

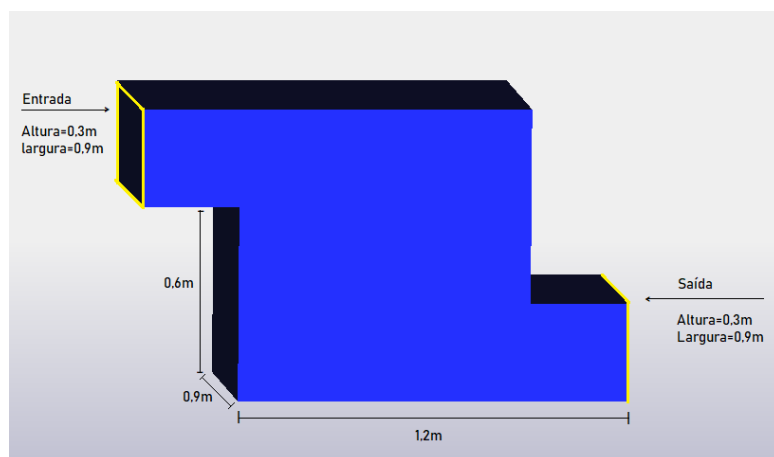


Figura 3: Dimensões da geometria do degrau. Fonte: Do autor.

Após a construção e definição do domínio, o arquivo com as informações da geometria foi exportado em formato “step” para o software Gmsh, para o início do processo de geração da malha computacional. A malha foi gerada usando um fator de elemento de 0,1, que se refere ao volume dos elementos (tetraedros) que a compõe. Assim, uma malha tetraédrica (Figura 3) com 442661 elementos e 62724 nós nos volumes de controle foi gerada e exportada em formato “msh” para o software OpenFOAM. A exportação é feita automaticamente usando o comando GmshToFoam. A malha tridimensional gerada é mostrada na Figura 4.

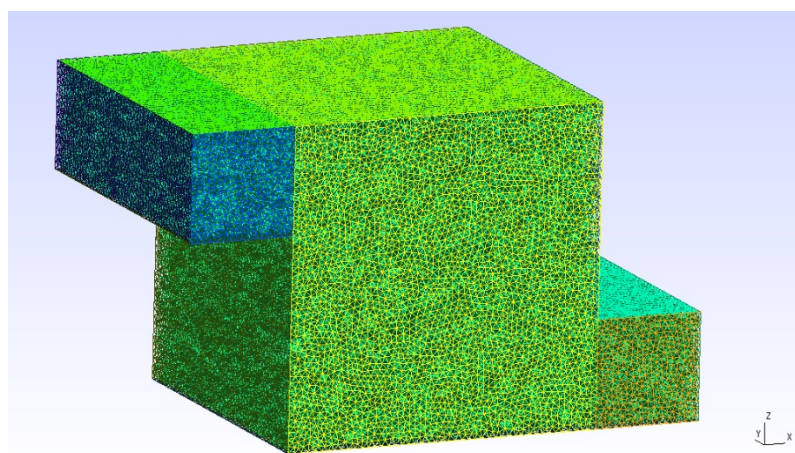


Figura 4: Malha tetraédrica tridimensional (3D), composta por 442661 elementos e 62724 nós. Fonte: Do autor.

2.3.2 Solver

A escolha e adaptação do solver adequado é um dos principais fatores que contribuem para um resultado concreto da simulação realizada. Esta escolha deve considerar sempre todos dos fatores físicos do escoamento tratado. Cada solver disponibilizado no ambiente OpenFOAM utiliza um conjunto de algoritmos que solucionam o escoamento tratado de formas diferentes, o que consequentemente gera diferentes resultados do escoamento.

A etapa de solver foi realizada utilizando os diretórios do OpenFOAM. Os arquivos de configuração foram alterados a partir de diretórios já existentes no pacote de tutoriais, que é disponibilizado com a instalação do software.

Para simular o escoamento em degrau, o solver pisoFoam foi utilizado como base de referência. O pisoFOAM é assim denominado por aplicar o operador de divisão implícita de pressão PISO (Pressure-Implicit-Split-Operator), utilizado também em [1], na solução das equações de Navier-Stokes. O solver icoFoam também foi testado mas não apresentou resultados satisfatórios, não sendo capaz de captar com precisão as linhas de corrente do escoamento na entrada e saída do degrau. O algoritmo PISO é um procedimento iterativo para solução das equações de acoplamento para conservação de massa e momento, que avalia e corrige a solução para cada instante de tempo. O algoritmo PISO também considera o número de Courant, dado por:

$$C_o = \frac{U \Delta t}{\Delta x} \quad (11)$$

onde U é a velocidade do fluido no volume de controle, Δt é o passo de tempo e Δx é a distância entre os centros dos volumes de controle. No OpenFOAM, o cálculo é baseado no volume de cada elemento da malha e não na distância Δx .

Como citado anteriormente o volume dos tetraedros que compõe a malha do degrau é de $0.1m^3$ e a velocidade utilizada foi de $0.1m/s$. Logo, temos que para $C_o < 1$ segue que:

$$1 > C_o = \frac{0.1 \Delta t}{0.1} \Rightarrow 1 < \Delta t \quad (12)$$

Assim, para a simulação do escoamento no degrau foi utilizado $\Delta = 0.01$ s e o tempo de escoamento simulado foi de 1 segundo. O valor de Δt refere-se ao tempo de iteração temporal que o solver utiliza, isto é, o passo de tempo utilizado para realizar os cálculos. Logo, a cada 0.01 s de 0 s a 1 s informações do escoamento foram calculadas e guardadas em diretórios.

Em relação as condições iniciais, o perfil de velocidade foi especificado na região de entrada. Para as demais regiões, as velocidades foram inicializadas como nulas. Já o perfil de pressão é inicializado como nulo em toda a região de domínio.

O número de Reynolds pode ser definido através da equação 13 adequada para o caso do degrau:

$$Re = \frac{U_x \cdot \Delta x}{\nu} \quad (13)$$

em que U_x é a velocidade na direção x , ou seja, a velocidade de entrada (0, 1m/s), Δx é a distância percorrida pelo fluido em x (1, 5m) e ν é a viscosidade cinemática do fluido, que por se tratar de uma condição reológica, é dada como parâmetro de entrada pelo usuário. Portanto, utilizando $\nu = 0,005$ segue que:

$$Re = \frac{0,1 \cdot 1,2}{0,005} = 24 \quad (14)$$

Vale salientar que ν é dado por:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (15)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido e ρ é a densidade do fluido.

O valor da viscosidade cinemática da água em temperatura ambiente é $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$. No entanto, a utilização deste valor para a viscosidade cinemática acarretaria em um número de Reynolds muito alto, tornando o escoamento turbulento e aumentando a complexidade da modelagem. Assim, para manter o regime laminar do escoamento e simplificar o processo de simulação, optou-se por utilizar o valor de $\nu = 0.005$. Com isso, o fluido poderia ser tratado

com características físicas de algum tipo de lama, comum em barragens para armazenamento de resíduos da indústria de mineração, por exemplo. Todo o pós-processamento das simulações foi efetuado na extensão Paraview do OpenFOAM.

3 Resultados

As simulações foram efetuadas considerando a modelagem computacional de um escoamento de fluido Newtoniano, em degrau confinado, unidimensional, incompressível, laminar e transiente. O valor do número de Reynolds foi $Re = 24$ (equação 14), e a velocidade de entrada do fluido no domínio computacional adotada foi $0,1\text{m/s}$.

Os cálculos foram realizadas em um processador Intel Core i5 - 5200U 2.20 GHz, com sistema operacional Linux, utilizando o software OpenFOAM. O tempo de escoamento simulado foi de 1 segundo e o passo de tempo $\Delta t = 0.01\text{ s}$.

Vale ressaltar que, neste estudo, as características do escoamento como o comportamento do fluido, linhas de corrente, perfil de velocidade e pressão são mostradas sem análises que visam a otimização do perfil dissipativo. Zonas de recirculação também puderam ser observadas a partir de alguns resultados obtidos. Análises físicas dessas características são feitas com o intuito de validar o processo de simulação e futuramente podem ser utilizadas para auxiliar um possível estudo do perfil dissipativo dos degraus.

Na Figura 5 é possível visualizar o comportamento do fluido em relação a estrutura do degrau através da análise das linhas de corrente. Note que o fluido não chega a tocar toda a estrutura da geometria. Na parte inferior direita e superior esquerda, há uma mudança na geometria do degrau. Um fenômeno denominado separação ocorre, como uma consequência do fato da camada limite não conseguir acompanhar essa mudança.

Analisando o perfil de pressão na Figura 6, observa-se que os valores são mais altos na entrada e vão diminuindo ao longo do degrau, se aproximando de zero na saída. Este resultado é fisicamente pertinente, já que o fluido tende a escoar sempre da região de pressão mais alta para a de pressão mais baixa, sendo a diferença de pressão entre dois pontos, a causa mais comum do escoamento de

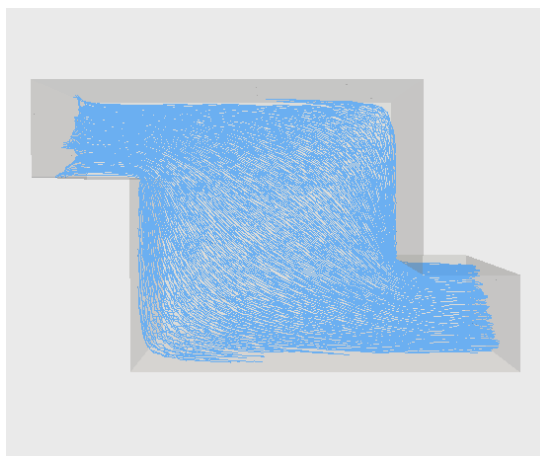


Figura 5: Perfil do escoamento. Fonte: Do autor.

um fluido [3].

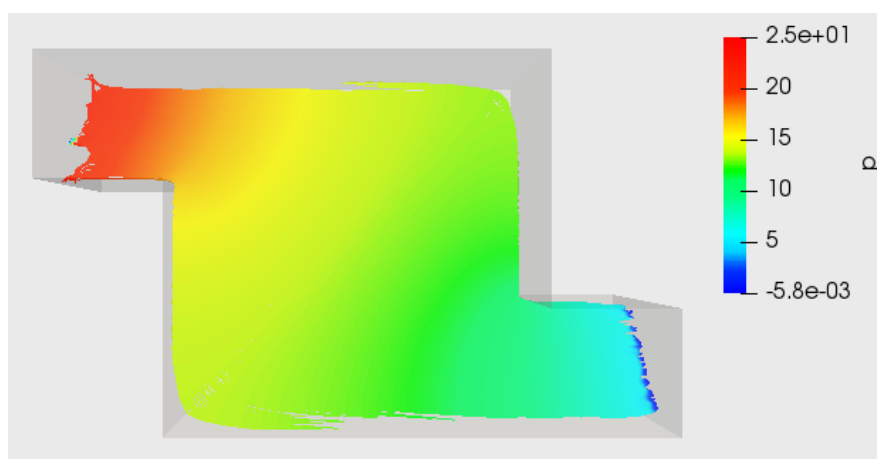


Figura 6: Gradiente de pressão do escoamento. Fonte: Do autor.

O gradiente de velocidade pode ser observado na Figura 7. Note que, no canto superior à direita e no canto inferior à esquerda do degrau, os valores para a velocidade se aproximam de zero, o que fisicamente indica que o movimento do fluido nessas regiões é quase nulo. Regiões com esse tipo de comportamento são comumente chamadas de zonas mortas. No caso dos vertedouros, a ocorrência de zonas mortas é desejável, para que os gradientes de velocidade sejam reduzidos o máximo possível.

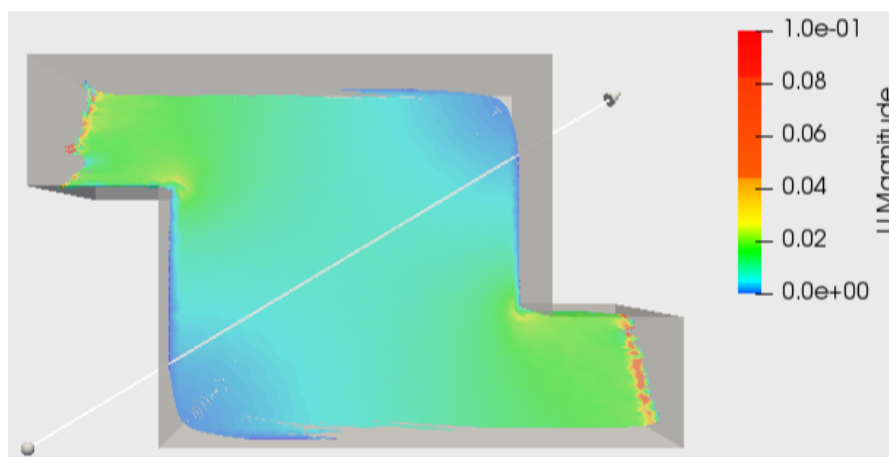


Figura 7: Gradiente de velocidade do escoamento. Fonte: Do autor.

De acordo com Fortuna [3] e Filho [2], quando a geometria de uma parede muda, uma zona de recirculação é formada a jusante do degrau. Esta zona de recirculação é caracterizada pelos redemoinhos que se formam nessa região. Dependendo da intensidade do escoamento (número de Reynolds), é possível a formação de uma segunda zona de recirculação na parede superior do canal. Deve-se salientar que a presença desses redemoinhos não define se o escoamento é laminar ou turbulento. Um exemplo desse fenômeno pode ser observado na Figura 8.

A zona de recirculação formada a jusante do degrau, proveniente da separação entre a camada limite e a parede do canal, tem seu comprimento delimitado por um ponto de recolamento (posição onde ocorre transição entre o escoamento ascendente e descendente) [2]. Neste local, a velocidade é aproximadamente nula, o que explica a presença das regiões de zona morta mostradas na Figura 7.

Ainda segundo Filho [2], no regime laminar o comprimento da zona de recirculação aumenta linearmente com o aumento do número de Reynolds. Como o número de Reynolds utilizado na simulação do escoamento no degrau neste estudo tem um valor muito baixo, com características reológicas de um material parecido com lama, o comprimento da zona de recirculação formada é quase imperceptível, como pode ser observado na Figura 9 e Figura 10.

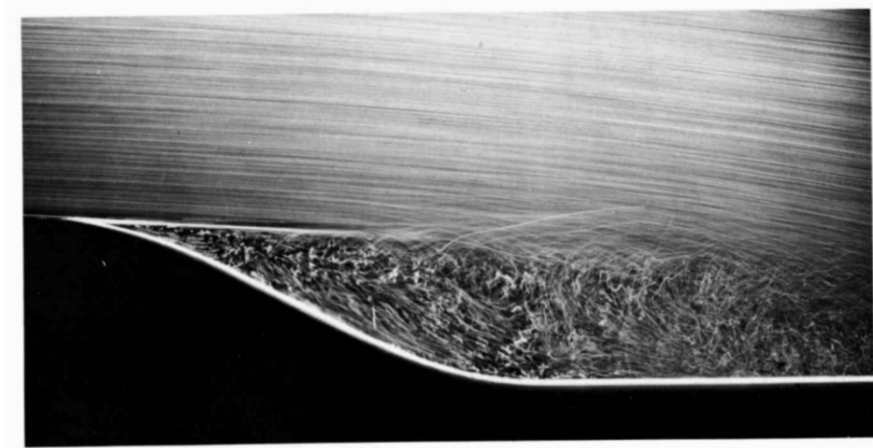


Figura 8: Separação laminar em uma parede curva de acordo com o trabalho de Filho [2]

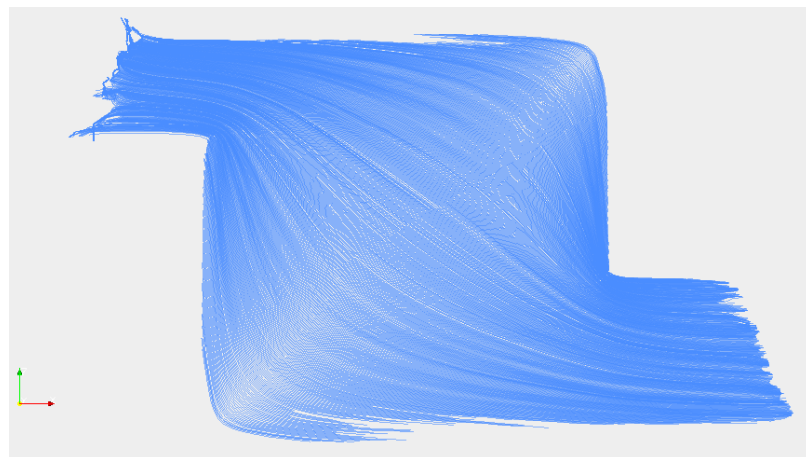


Figura 9: Zona de recirculação do fluido. Fonte: Do autor.

4 Conclusão

A simulação computacional tem um papel fundamental no tratamento de problemas de fluidodinâmica, reduzindo o tempo e custos de projetos e permitindo explorar fenômenos que não poderiam ser estudados em laboratório de forma prática. O conhecimento prévio das características físicas do escoamento, e dos aspectos matemáticos das equações que o modelam, facilitam o processo de simulação, permitindo introduzir condições de contorno e escolher os métodos

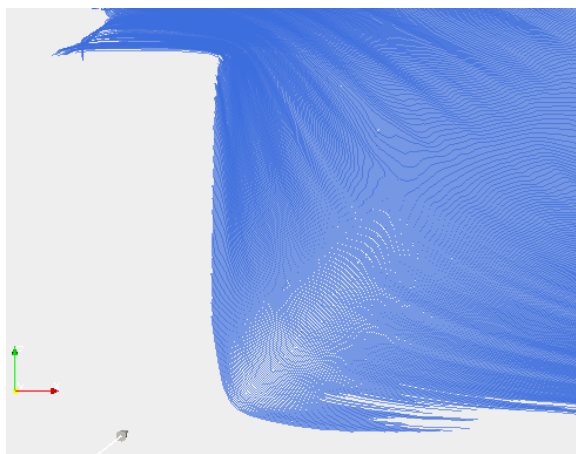


Figura 10: Zona de recirculação ampliada. Fonte: Do autor.

de solução, de forma adequada ao problema tratado.

Considerando o alto custo dos softwares comerciais e a falta de acesso aos detalhes do código fonte, o OpenFOAM é uma ferramenta de simulação que se mostra viável no tratamento de escoamento de fluidos. Além de ser livre, gratuito e de fácil acesso, disponível online pra download, o OpenFOAM é compatível com outros softwares de geração de geometria e malha facilitando o processo de pré-processamento. O pacote disponibiliza vários solvers para diferentes tipos de escoamento, sendo possível a criação de novas rotinas ou adequação das disponíveis ao problema a ser resolvido, o que se mostra de grande vantagem considerando a complexidade e os detalhes específicos de cada caso que um escoamento pode apresentar. Além disso, o pacote também possui ferramentas de visualização de dados incorporadas ao pacote que permitem visualizar de forma gráfica: gradientes de pressão e velocidade, linhas de corrente, dentre outras ferramentas que facilitam o processo de pós-processamento, resultando em análises mais elaboradas que acarretam resultados melhores da simulação.

Neste estudo, foi simulado um escoamento em degrau, uma comum aplicação na construção de vertedouros reais. A partir das análises físicas dos resultados obtidos da simulação do escoamento interno em degrau, pôde-se concluir que a geometria e malha utilizadas são representativas e capazes de captar o perfil do escoamento com qualidade. Além disso, o método de solução (solver) escolhido,

no caso o PisoFOAM, é adequado e apropriado ao problema tratado, gerando resultados concretos e fisicamente plausíveis, o que é comprovado pela validação através da comparação qualitativa com os resultados experimentais disponíveis em Filho [2] e dos resultados numéricos disponíveis em Arantes [1].

5 Agradecimentos

Ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia Matemática (INCT-MAT) que conta com apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- [1] Eudes José Arantes. *Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degrau via CFD*. PhD thesis, Programa de Pós Graduação em Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.
- [2] Décio L. M. Filho. Estudo numérico do escoamento sobre um degrau com a presença de um obstáculo de seção retangular. Master's thesis, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2018.
- [3] Armando O. Fortuna. *Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos: Conceitos Básicos e Aplicações*, volume 1 Edição. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- [4] Tobias Holzmann. *Mathematics, Numerics, Derivation and OpenFOAM: The Basics for Numerical Simulations*, volume 4 edição. CFD, Leoben, 2017.
- [5] Fernando Sandro Velasco Hurtado. Uma formulação de volumes finitos baseada em elementos para simulação do deslocamento bifásico imiscível em meios porosos. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2005.
- [6] Clovis R. Maliska. *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, volume 2. LTC, 2014.

- [7] Daniela G. Sanagiotto. Características do escoamento sobre vertedouros em degrau de declividade 1v:0,75h. Master's thesis, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2003.
- [8] Bruce R. Munson Theodore H. Okiishi, Donald F. Young. *Fundamentos da Mecânica dos Fluidos*, volume 4. Blucher, 2004.