



Investigação numérica dos vórtices de Dean

Numerical analysis of the Dean vortices

Felipe Pinheiro Silva de Almeida Prado¹, Fábio Kenji Suguimoto²,
Marcos Antonio de Souza Lourenço³

RESUMO

Os cotovelos em tubo desempenham um papel importante em muitos sistemas de encanamento e tubulação, garantindo uma mudança de direção do fluxo de fluido. No presente trabalho é realizada uma investigação numérica do fenômeno físico característico de escoamentos de fluidos nesses acessórios, chamado vórtices de Dean, que se manifestam como instabilidades na forma de recirculações contra-rotativas, resultantes da força centrífuga causada pela curvatura da geometria do tubo. O problema é modelado a partir das equações de conservação da massa e do balanço de quantidade de movimento linear e discretizados por métodos de discretizações espacial e temporal de segunda ordem, utilizando o método de volumes finitos em um software livre, chamado OpenFOAM. Trata-se do estudo a respeito de um escoamento incompressível e em regime permanente, de um fluido newtoniano, ocorrendo com valores moderados para o número de Reynolds. Os resultados são apresentados e interpretados quantitativa e qualitativamente para duas simulações com malhas de diferentes densidades, um grosseira e outra refinada. Os valores determinados se mostraram próximos, quando comparados com aqueles esperados na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: Cotovelo; Dinâmica dos Fluidos Computacional; OpenFOAM; Vórtices de Dean.

ABSTRACT

Pipe elbows play an important role in many plumbing and piping systems, providing a change in the direction of fluid flow. In this paper, we perform a numerical study of the physical phenomenon characteristic of fluid flow in these fittings, called Dean's vortices, which manifest themselves as instabilities in the form of counter-rotating recirculations resulting from the centrifugal force caused by the curvature of the pipe geometry. The problem is modeled using the conservation of mass and momentum equations and discretized using second-order spatial and temporal discretization methods using the finite volume method in a free software called OpenFOAM. This is a study of incompressible, steady-state flow of a Newtonian fluid, with moderate Reynolds number values. The results are presented and interpreted quantitatively and qualitatively for two simulations with meshes of different densities, one coarse and the other refined. The values determined are close to those expected from the literature.

KEYWORDS: Elbow; Computational Fluid Dynamics; OpenFOAM; Dean Vortices

INTRODUÇÃO

A simulação numérica utilizando o método CFD (Dinâmica dos Fluidos Computacional) é uma ferramenta poderosa para o estudo de fenômenos fluidodinâmicos em diversos setores da engenharia, como aeroespacial, automotivo, naval, petróleo e gás, entre outros. A utilização do CFD permite

¹ Bolsista do CNPq. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: lipeprado13@gmail.com. ID Lattes: 3639128910541264.

² Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: fsuguimoto@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8270074009363056.

³ Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, PR, Brasil. E-mail: mlourenco@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8818311395718614.



a análise de fluxos complexos, que muitas vezes não podem ser resolvidos de forma analítica ou experimental, e pode fornecer informações precisas sobre o comportamento de fluidos em diferentes condições de operação.

ESCOAMENTOS VISCOSOS INTERNOS

Escoamentos viscosos internos são aqueles em que a camada limite é formada na superfície interna de uma tubulação ou canal, e são de grande importância na engenharia, especialmente na indústria química, petroquímica, de processos e de petróleo e gás. O estudo desses escoamentos envolve a análise de propriedades como a velocidade, pressão e viscosidade, bem como a interação entre o fluido e as paredes da tubulação (FOX; MCDONALD; MITCHELL, 2020).

INSTABILIDADES EM ESCOAMENTO DE FLUIDOS

Tubos de canal curvado, sejam eles espirais ou helicoidais, têm atraído significativa atenção de pesquisadores em todo o mundo e são amplamente aplicados na indústria, como em reatores químicos e também em usinas, nas bombas e turbinas. A geometria do canal curvado é intimamente relacionados à formação de fluxos secundários conhecidos como vórtices de Dean. A compreensão desse fenômeno vem sido mais desenvolvida a partir de simulações em CFD e é crucial para otimizar um projeto com esses dispositivos.

Os escoamentos secundários de Dean são gerados devido à diferença de velocidade entre os elementos fluidos próximos à linha central e a parede curvilínea do canal. A presença de curvatura no canal gera uma força centrífuga que atua perpendicularmente ao fluxo principal ao longo do eixo. A maior inércia dos elementos fluidos próximos à linha central faz com que sejam empurrados para fora, criando, assim, um gradiente de pressão na direção radial devido às forças centrífugas presentes. Para satisfazer a equação de continuidade, os elementos fluidos próximos à parede circulam para dentro.

Dessa forma, o escoamento em um dispositivo de canal curvado é caracterizado pela presença de vórtices secundários de rotação contrária perpendicularmente ao fluxo axial principal, conhecidos como vórtices de Dean. Esses vórtices de Dean são responsáveis por influenciar o padrão de fluxo e a transferência de massa e calor dentro do dispositivo. A sua presença pode levar a uma maior mistura e aumento do coeficiente de transferência de massa e calor, o que é desejável em muitas aplicações industriais. Choudhary realizou uma pesquisa afirmando que a curvatura foi vantajosa para um micro-reator pois com a formação dessas recirculações houve um desempenho melhor no catalisador (CHOUDHARY; PUSHPAVANAM, 2017).

No artigo de Jéssica Oliveira (BRITO LIRA et al., 2022), avaliou-se os o efeito desses vórtices em um fluxo de filtrado aprimorado e na eficiência do processo de filtração. A partir das simulações em CFD, os pesquisadores observaram resultados importantes do fluxo secundário: um aumento da tensão de cisalhamento na parede causando uma deposição de partículas reduzida e uma transferência de massa aprimorada entre a camada limite e a fase bulk.



METODOLOGIA

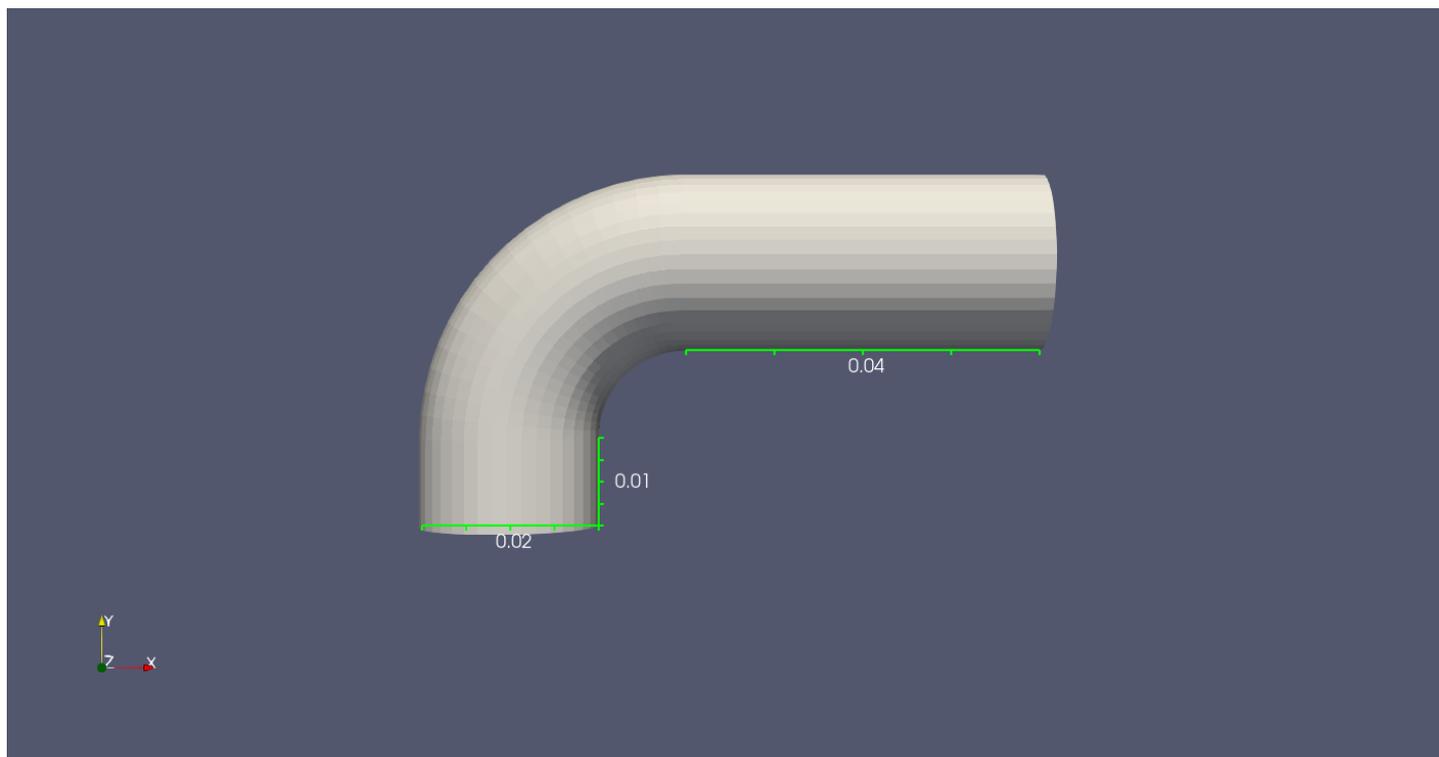
O escoamento é governado pela *Equação de Conservação da Massa*, Eq. 1, e de *Balanco de Quantidade de Movimento*, Eq. 2. Logo neste trabalho consideramos um sistema formado por um escoamento viscoso e incompressível. Tomando que o fluido possui propriedades físicas constantes, como massa específica ρ e a viscosidade cinemática ν .

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

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\vec{V} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2\vec{V} + \frac{\vec{f}}{\rho} \quad (2)$$

O estudo envolve um joelho de 90 graus com 20 milímetros de diâmetro onde água percorre a x velocidade. Essa tubulação possui uma entrada de 10 milímetros e logo após o joelho de 90 graus até a saída possui 40 milímetros de comprimento. O modelo com as medidas mencionadas, utilizando o ParaView, é mostrado na Fig. 1. As medidas apresentadas nessa figura estão em metros.

Figura 1 – Medidas do modelo

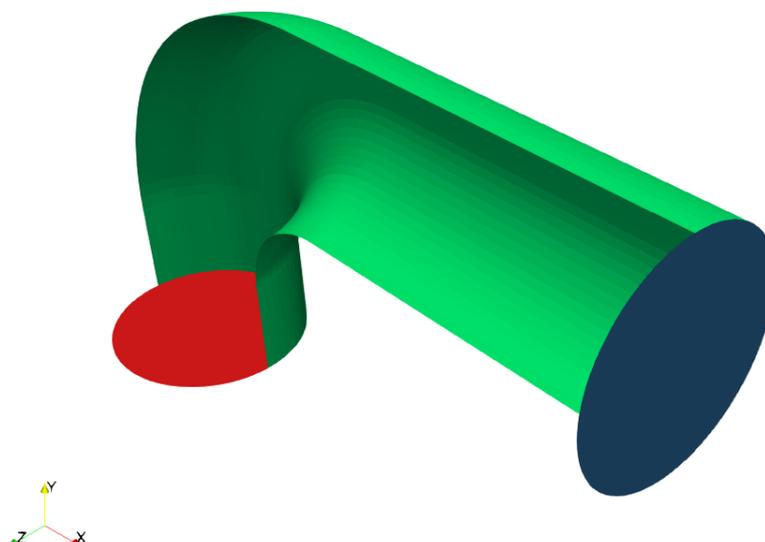


Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

A Figura 2 foi elaborada para representar de melhor forma as condições de contorno da simulação.



Figura 2 – Condições de Contorno



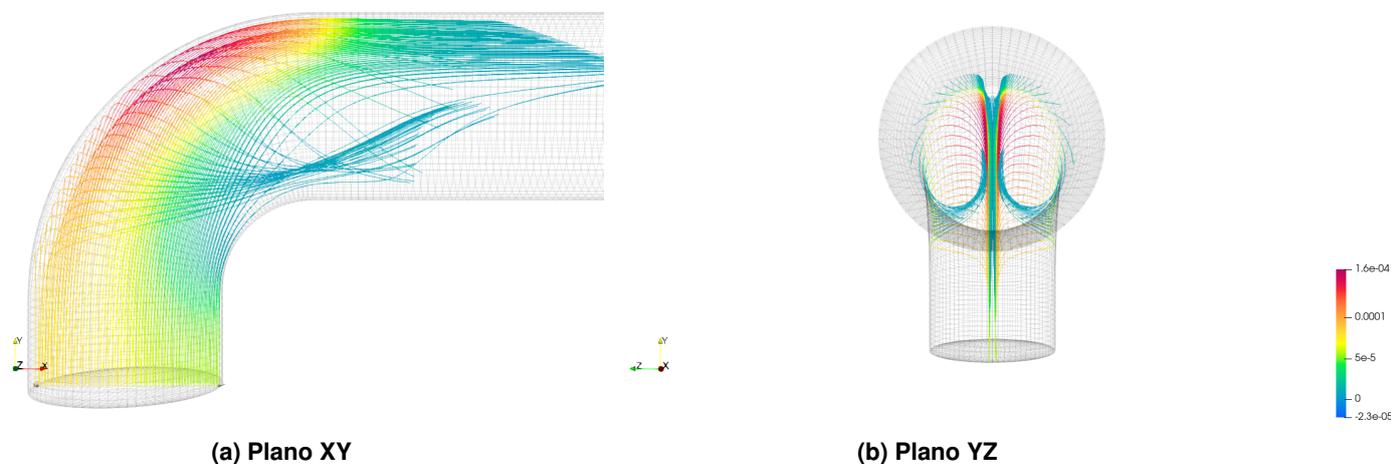
Fonte: Elaborado pelos autores (2023)

As cores em vermelho e azul representam a entrada e a saída do fluido, respectivamente. Na entrada, a água tem um perfil de velocidade parabólico, onde sua velocidade máxima atinge 0,02 m/s e sua velocidade média é de 0,01 m/s. Enquanto isso, para a parede, realizou-se uma seção pela metade para melhor representação.

RESULTADO E DISCUSSÕES

Definidas as condições de contorno, as dimensões do projeto e todo o modelo matemático, realizou-se a simulação pelo OpenFOAM, atingindo uma convergência em 2.2 segundos. Logo, utilizando o ParaView, a figura 3 apresenta as linhas de corrente próximas do centro ao decorrer do cotovelo.

Figura 3 – Vórtices de Dean



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Percebe-se um aumento no gradiente de pressão na parte superior do tubo e recirculações causadas pela curvatura. A concentração do fluido na parte superior e os vórtices causam uma perda de carga, notável pela diferença de cores na entrada e saída da tubulação.

CONCLUSÃO

É de suma importância a continuação dos estudos de mecânica dos fluidos computacional, e a análise dos vórtices de Dean desempenha um papel crucial, pois para melhorar o desempenho e eficiência de uma variedade de sistemas é necessário compreender e modelar esses vórtices. Investir nessa pesquisa contribuirá significativamente para avanços tecnológicos e soluções mais eficazes em diversos campos.

Agradecimentos

À UTFPR de Cornélio Procópio e principalmente ao CNPq por viabilizar recursos pela bolsa PIBIC.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

BRITO LIRA, Jéssica Oliveira de et al. Fluid dynamics and mass transfer in curved reactors: A CFD study on Dean flow effects. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 10, n. 5, p. 108304, 2022. ISSN 2213-3437. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108304>. Disponível em: [↗](#).



XIII Seminário de Extensão e Inovação XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR

SEI-SICITE
2023



CHOUDHARY, A.; PUSHPAVANAM, S. Process intensification by exploiting Dean vortices in catalytic membrane microreactors. **Chemical Engineering Science**, v. 174, p. 413–425, 2017. ISSN 0009-2509. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.09.005>. Disponível em: [↗](#).

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; MITCHELL, J.W. **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics**. [S.l.]: Wiley, 2020. ISBN 9781119721024. Disponível em: [↗](#).