

ANÁLISE BIDIMENSIONAL DO ESCOAMENTO SUB-CRÍTICO AO REDOR DE UM CILINDRO LISO UTILIZANDO O OPENFOAM

Vittorio Nardin, vnardin94@gmail.com
Jeferson Avila Souza, jasouza1974@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Av. Itália, s/n – km 8 – Carreiros, Rio Grande – RS.

Resumo. Com o objetivo de prever as forças resultantes da interação fluido estrutura em um cilindro submetido a um escoamento transversal, o presente trabalho compara dados de coeficiente de arrasto e sustentação experimentais contidos na literatura com os respectivos dados obtidos através de simulações numéricas realizadas com o software OpenFOAM. O número de Reynolds analisado é igual a 10.000, ou seja, trata-se de um regime de escoamento turbulento com a presença do fenômeno de desprendimento de vórtices. Independência da solução com a malha e passo de integração (discretização no tempo) foram devidamente estudados, garantindo desta forma a qualidade dos resultados obtidos. Os resultados indicam erros inferiores a 4% para o coeficiente de arrasto médio e inferiores a 6% para o número de Strouhal, revelando a precisão dos modelos utilizados na previsão tanto da intensidade das forças resultantes quanto da frequência de oscilação das mesmas. São mostrados também os campos de pressão e velocidade de todo o domínio computacional simulado.

Palavras chave: CFD. OpenFOAM. Escoamento externo. Modelos de turbulência. Cilindro liso.

Abstract. Aiming to predict the resultant forces on a circular cylinder over an external transverse flow, this paper makes a comparison of the experimental drag and lift coefficients available in literature with the corresponding numerical data obtained with the OpenFOAM software. The Reynolds number of the flow is 10.000, thus, the flow is turbulent with the presence of the vortex shedding phenomenon. Solution independence test and integration time step (time discretization) were taken into account in order to guarantee trustful results. Results indicate calculation of errors lower than 4% for the drag coefficient and lower than 6% for the Strouhal number. This shows the precision of the utilized numerical models in the prediction both for the intensity of the forces and its frequency of oscillation. Pressure and velocity fields are also presented for the whole simulated computational domain.

Keywords: CFD, OpenFOAM, External flow. Turbulence models. Smooth cylinder.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento ao redor de estruturas cilíndricas é um problema típico do estudo da hidrodinâmica e seu avanço é acompanhado de perto por diversos setores da indústria, principalmente pelo setor marítimo e offshore. Cabos submarinos, tubulações para transporte e extração de petróleo e seus derivados, colunas estruturais e plataformas de cultivo de animais marinhos são exemplos de estruturas com forma predominantemente cilíndrica que estão submetidas à ação tanto de ondas quanto de correntes oceânicas. A previsão dos esforços resultantes da interação fluido estrutura, nesses casos, geralmente é feita de maneira experimental acarretando em maiores custos de projeto. Porém, atualmente, com a explosão da capacidade de processamento dos computadores, o uso de simulações numéricas está se difundindo cada vez mais, e as análises hidrodinâmicas estão seguindo por um novo caminho. Através das simulações é possível obter uma visualização dos campos de velocidade e pressão em todos os pontos de interesse, permitindo o entendimento do comportamento do fluido até mesmo em regiões afastadas da estrutura, algo que pode revelar aos engenheiros possibilidades de otimização do projeto. O software OpenFOAM (Weller, Greenshields e Rouvray) é um programa de licença gratuita (*opensource*) destinado a análises estruturais e dinâmica dos fluidos computacional. Trata-se de uma biblioteca orientada a objetos implementada em C++ com possibilidade de discretização pelos métodos de elementos finitos e volumes finitos com suporte para malhas poliédricas geradas em outros softwares. Ele disponibiliza diversos modelos de turbulência assim como diversos métodos numéricos diferentes para resolução das equações que governam os mais variados fenômenos físicos.

Sumer & Fredsoe (2006) apresentam os desenvolvimentos teóricos e experimentais sobre a hidrodinâmica ao redor de estruturas cilíndricas submetidas a escoamentos externos. Atualmente, estudos buscam comparar a precisão de diferentes modelos de turbulência na previsão dos fenômenos físicos presentes na interação fluido estrutura do escoamento turbulento externo em estruturas cilíndricas. Di Zhang (2017) compara oito modelos de turbulência

classificados como RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) e conclui que o modelo $k-\omega$ SST é o mais preciso na previsão do coeficiente de arrasto médio. Sangamesh, Ramesha e Suman Basu (2014) apresentam a modelagem do escoamento de transição superior ($Re > 10^6$) utilizando o modelo $k-\epsilon$ no OpenFOAM.

O presente trabalho visa contribuir com a modelagem bidimensional do regime sub-crítico de escoamento no OpenFOAM com o modelo de turbulência $k-\omega$ SST. A malha computacional foi elaborada no software Gmsh e os dados de coeficiente de arrasto e sustentação obtidos pela simulação numérica foram analisados através do software Octave e posteriormente comparados aos dados experimentais contidos na literatura. Além disso, os campos de velocidade e pressão para todo o domínio simulado foram calculados para cada incremento de tempo possibilitando o estudo detalhado do fenômeno de desprendimento de vórtices e a esteira formada a jusante do cilindro. Esta área é caracterizada por regiões de baixa pressão e alterações na velocidade do fluido implicando em um fluxo totalmente diferente do fluxo incidente, ou seja, estruturas do projeto que venham a se localizar nesta área devem estar dimensionadas de acordo com estas alterações de escoamento.

2. METODOLOGIA

O escoamento de um fluido ao redor de um cilindro circular tem seu padrão descrito através do número de Reynolds

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (1)$$

onde U é a velocidade do escoamento incidente [m/s], ou seja, do escoamento não perturbado pela presença do cilindro, D é o comprimento característico da estrutura [m], no caso, o diâmetro do cilindro, e ν representa o fluido que escoar, mais especificamente, sua viscosidade cinemática [m²/s].

Para $Re = 10.000$, é formada uma esteira (região onde o escoamento é perturbado pela presença da estrutura) totalmente turbulenta com a presença do fenômeno de desprendimento de vórtices. Ao mesmo tempo, observa-se que os pontos de separação (A) e as camadas limite (região entre os pontos de separação e o ponto de estagnação) permanecem laminares, conforme mostrado na Fig. 1. Este escoamento é conhecido como Regime Sub-crítico.

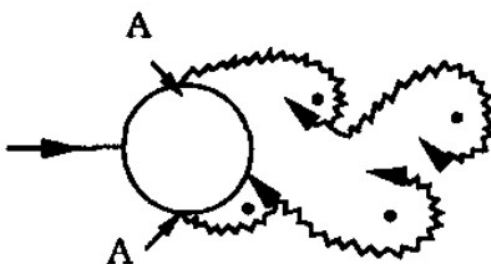


Figura 1. Regime sub-crítico de escoamento (Sumer e Fredsoe, 2006)

O fenômeno de desprendimento de vórtices surge devido à geometria divergente da metade posterior do cilindro. Esta geometria impõe um gradiente de pressão contrário à direção do escoamento, forçando o fluido a girar com o mesmo sentido da superfície do cilindro dando origem a um par de vórtices em equilíbrio, com sentidos de rotação opostos, imediatamente à jusante da estrutura cilíndrica. Na presença de pequenas perturbações (turbulência) esse par de vórtices perde a condição de equilíbrio e passam a se desprender alternadamente. Isso ocorre quando o número de Reynolds ultrapassa o valor de 40.

A frequência de desprendimento de vórtices, quando normalizada com o comprimento característico do cilindro e a velocidade incidente, dá origem ao adimensional conhecido como número de Strouhal, definido como

$$St = \frac{f_v D}{U} \quad (2)$$

onde f_v é a frequência de desprendimento de vórtices.

A principal consequência deste fenômeno é o comportamento periódico apresentado pela distribuição de pressão ao redor do cilindro, resultando em uma variação periódica nas componentes da força resultante sobre o cilindro: força de arrasto e força de sustentação.

O coeficiente de arrasto médio, ou simplesmente coeficiente de arrasto, representa a componente na direção do escoamento e é definido como (Fox et al., 2013)

$$\bar{C}_D = \frac{\bar{F}_D}{\frac{1}{2}\rho D U^2} \quad (3)$$

onde \bar{F}_D é a força de arrasto médio [N], composta pela soma da força de arrasto de pressão com a força de arrasto de fricção e ρ é a massa específica do fluido [kg/m³]. De maneira análoga, podemos escrever o coeficiente de sustentação que representa a componente da força resultante com direção perpendicular à direção do escoamento

$$\bar{C}_L = \frac{\bar{F}_L}{\frac{1}{2}\rho D U^2} \quad (4)$$

Tanto o número de Strouhal quanto os coeficientes de arrasto e sustentação são funções do número de Reynolds do escoamento, ou seja, seus valores variam de acordo com os diferentes regimes de escoamento descritos por esse adimensional. No caso do regime sub-crítico, uma série de experimentos confirmam que com $Re=10.000$, espera-se que $St=0,2$ e $\bar{C}_D=1,2$ (Sumer & Fredsoe, 2006). Ainda segundo Sumer e Fredsoe, a força de sustentação oscila com frequência igual a de desprendimento de vórtices, enquanto que a força de arrasto oscila com o dobro desta frequência.

Com base nestas informações, a previsão correta dos coeficientes de arrasto e sustentação deve revelar um comportamento oscilatório, onde o coeficiente de arrasto apresente o dobro da frequência de oscilação do coeficiente de sustentação. Além disso, o coeficiente de arrasto deve oscilar em torno de um valor positivo próximo a 1,2 enquanto que o coeficiente de sustentação, para o regime sub-crítico, deve oscilar em torno de zero, com frequência normalizada (Strouhal) aproximadamente igual a 0,2.

2.1 Descrição do problema

A Figura 2 apresenta de forma esquemática o problema em análise. O domínio computacional tem dimensões $L = 6,9$ m e $H = 5,0$ m enquanto que um cilindro com diâmetro $D = 0,1$ m está posicionado no centro do domínio computacional a uma distância $a = 2,45$ m da fronteira esquerda. A entrada do fluido “inlet” ocorre com uma velocidade constante livre de turbulência, as superfícies superior e inferior foram categorizadas como paredes onde não há aderência do fluido (slip condition), enquanto que a superfície que dá forma ao cilindro foi categorizada como aderente (no-slip condition) de forma a representar a condição de não deslizamento, essencial para correta modelagem do desprendimento de vórtices. Por fim, a saída do fluido “outlet” foi especificada como uma superfície com pressão nula, afim de se evitar a reflexão e refração do fluido, dando origem ao problema de escoamento reverso “reverse-flow”.

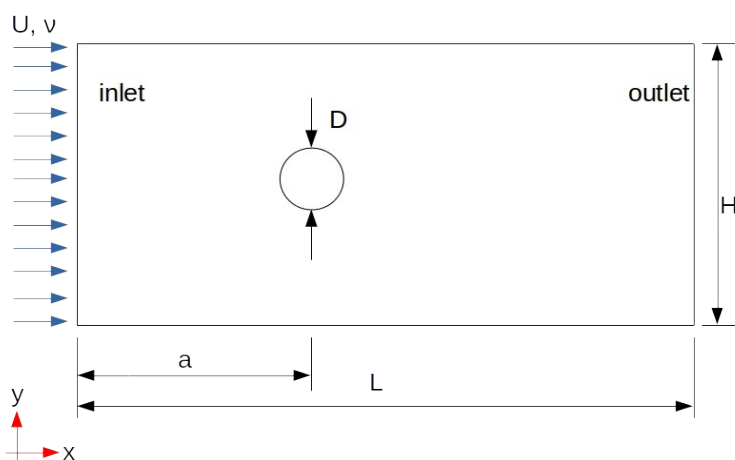


Figura 2. Especificação das condições iniciais do escoamento

O desenho da geometria e posterior discretização do domínio computacional foram realizados no software Gmsh (Geuzaine e Remacle). Buscou-se refinar o tamanho e formato dos volumes em duas regiões específicas: a região da esteira do escoamento (Fig. 3a) e a região da camada limite ao redor da superfície do cilindro (Fig. 3b).

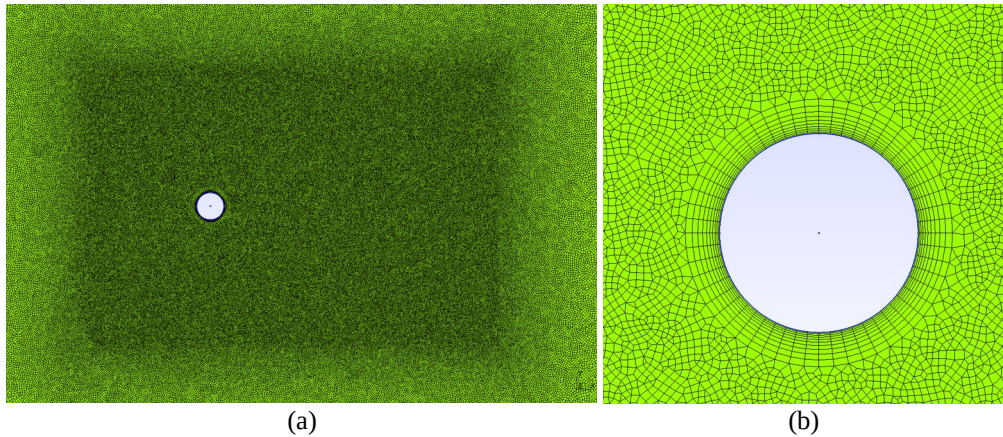


Figura 3. (a) vista superior da malha computacional utilizada revelando o refinamento na região da esteira; (b) detalhes do refinamento ao redor da superfície do cilindro

O modelo de turbulência escolhido foi o $K-\omega$ SST (OpenFOAM User Guide). Ele é descrito em função da energia cinética turbulenta (k), e taxa específica de dissipação de turbulência (ω), esses valores são calculados com base na intensidade de turbulência (I) esperada, em porcentagem, da seguinte maneira

$$k = \frac{3}{2} (I |u_{ref}|)^2 \quad (5)$$

$$\omega = \frac{k^{0,5}}{C_{\mu}^{0,25} L} \quad (6)$$

onde $C_{\mu} = 0,09$ é uma constante (OpenFOAM User Guide).

No presente trabalho o software OpenFOAM foi utilizado para a solução numérica do problema. O mesmo utiliza o método de Volumes Finitos para a discretização das equações de transporte. O solver escolhido foi o *pimpleFoam*, utilizado para escoamentos incompressíveis, turbulentos e transientes.

2.2 Teste de independência de malha

O valor do coeficiente de arrasto médio (C_d médio), foi utilizado para realização de um teste de independência de malha, descrito na Tab. 1. Este teste tem o objetivo de obter o tamanho de malha ideal, ou seja, o tamanho de malha que não interfira nos resultados finais da simulação e ao mesmo tempo não a torne excessivamente lenta e pesada do ponto de vista computacional. O Erro pode ser interpretado como o erro do caso simulado em relação ao anterior, indicando a perda de influência do tamanho de malha, calculado da seguinte forma

$$Erro = \frac{\bar{C}_{D_{i+1}} - \bar{C}_{D_i}}{\bar{C}_{D_{i+1}}} \times 100 \quad (7)$$

Tabela 1. Teste de Independência de Malha.

Tamanho de Malha (nº de células)	C_d (médio)	Erro
14 261	1,57	
57 718	0,84	86,82%
232 859	1,15	26,95%
363 916	1,24	7,25%
697 646	1,19	4,2%

De forma gráfica, na Fig. 4, é apresentado também o teste de independência de malha

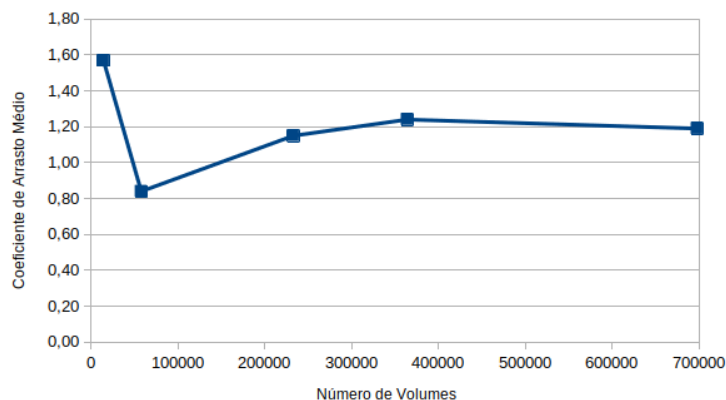


Figura 4. Teste de Independência de Malha

Foi assumido que a malha independente seria obtida quando o *Erro* fosse menor do que 5% desta forma, a malha com 363 916 volumes foi a escolhida. Detalhes desta malha são mostrados na Tab. 2.

Tabela 2. Parâmetros de Malha.

Número de volumes	363.916
Número de Hexaedros	238.338
Número de Prismas	80.578
Volume mínimo de célula	4,067E-06 [m ³]
Volume máximo de célula	2,79E-06 [m ³]
Volume total do domínio	0,08623 [m ³]
Aspect ratio máximo	5,783 (ok)
Skewness angle máximo	1,013 (ok)

Após a determinação da malha independente, os dados obtidos foram tratados no software *Octave* para visualização gráfica do comportamento dos coeficientes de arrasto e sustentação.

3. RESULTADOS

Os valores do coeficiente de arrasto e sustentação, tratados no *Octave*, são mostrados nas Figs. 5 e 6, respectivamente. A solução leva aproximadamente 2950 segundos simulados para atingir a convergência.

A média aritmética dos resultados de arrasto a partir do momento em que a convergência foi alcançada até o fim da simulação (3500s) revelam o valor do coeficiente de arrasto médio \bar{C}_D . A frequência de desprendimento de vórtices f_v pode ser obtida através da medição do período de oscilação do coeficiente de sustentação T_v , dando origem, posteriormente, à frequência adimensional conhecida como número de Strouhal, como mostra a Eq. (2). Os resultados são apresentados na Tab. 3 ao lado dos valores experimentais obtidos da literatura. O Erro foi calculado conforme a Eq. (7).

Tabela 3. Comparação dos resultados numéricos e experimentais.

Reynolds 10.000	Coeficiente de arrasto médio			Número de Strouhal		
	Simulação	Experimental	Erro	Simulação	Experimental	Erro
	1,24	1,2	3,2%	0,19	0,2	-5,3%

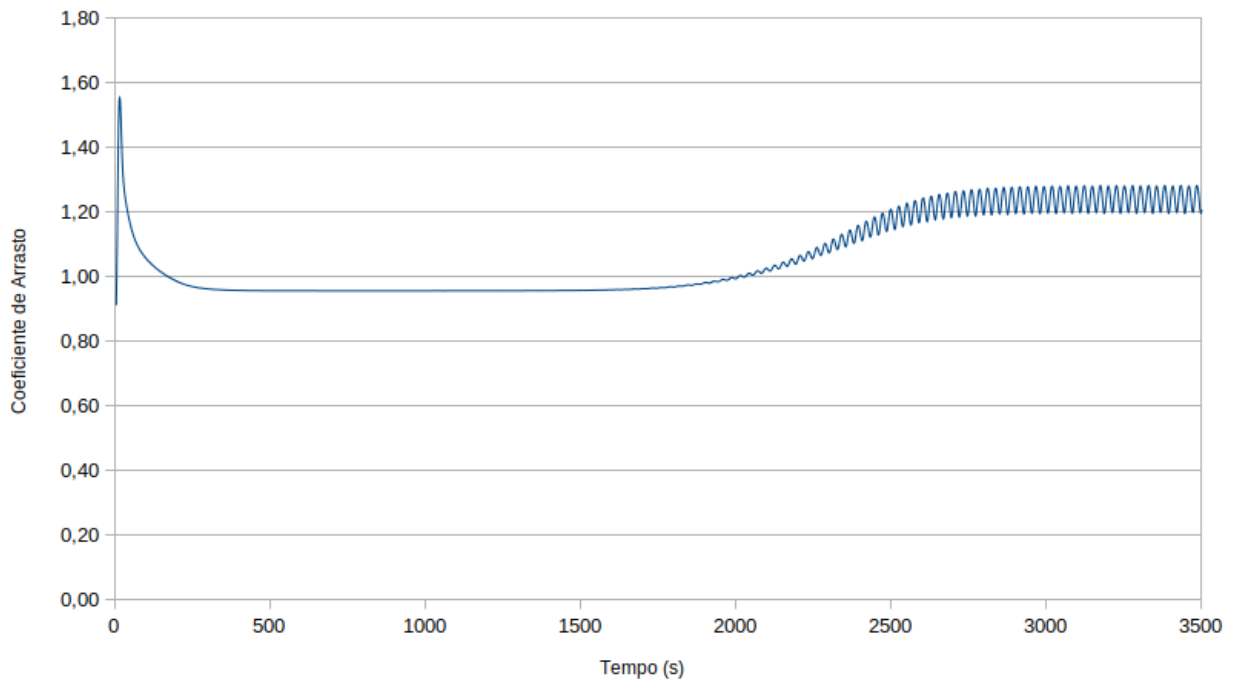


Figura 5. Coeficiente de Arrasto x Tempo

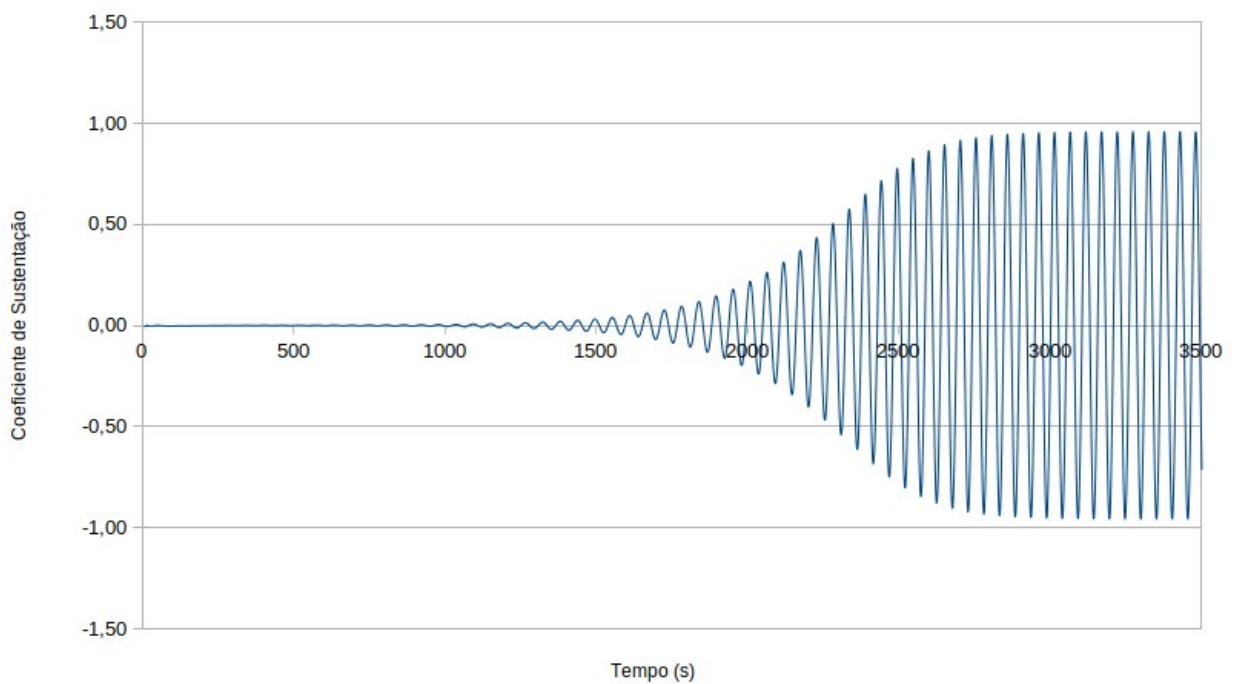


Figura 6. Coeficiente de Sustentação x Tempo

Os campos de velocidade e pressão para o domínio são apresentados nas Figs. 7 e 8.

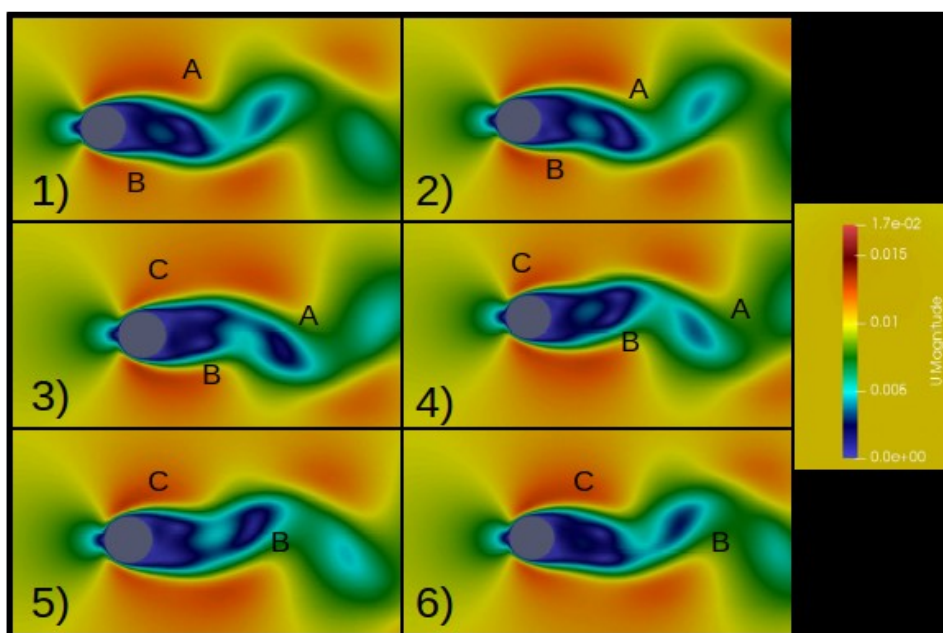


Figura 7. Campo de velocidade para todo o domínio simulado

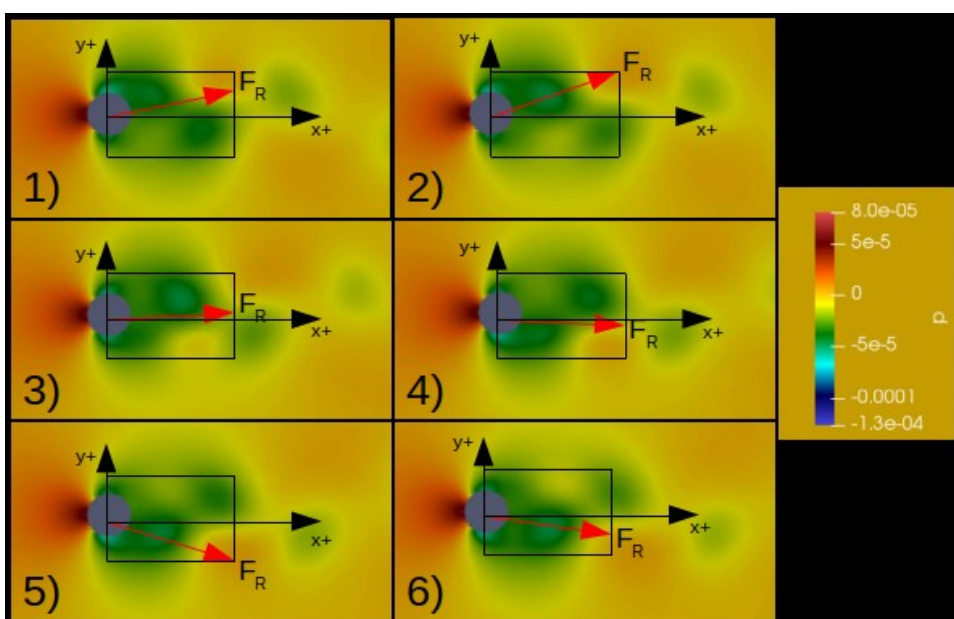


Figura 8. Campo de pressão para todo o domínio simulado

Na Figura 7 é possível observar com mais clareza o fenômeno de desprendimento de vórtices. Segundo Gerrard (1966) o vórtice identificado pela letra “A”, com vorticidade na direção horária, torna-se grande o suficiente para carregar o vórtice identificado pela letra “B”, com vorticidade anti-horária, em direção a esteira do escoamento. Em determinado momento, o vórtice “A” está tão afastado do cilindro que tem seu suprimento de vorticidade anulado pelo vórtice “B”, neste instante o vórtice “A” desprende-se na forma de um vórtice livre. Em seguida, o vórtice “B” torna-se grande suficiente para arrastar um novo vórtice formado, indenticado pela letra “C”, em direção a esteira do escoamento até ter, de maneira análoga ao “A”, seu suprimento de vorticidade anulado por “C” e também se tornar um vórtice livre. Por fim, o vórtice “C” repete o processo de “A”. Esse fenômeno ocorre alternadamente com determinada frequência enquanto o escoamento tiver um número de Reynolds > 40 . A Figura 9 ajuda a compreender melhor a origem do sentido de rotação horário do vórtice “A”. O mesmo ocorre na metade inferior do cilindro, originando a vorticidade com sentido de rotação anti-horário do vórtice “B”.

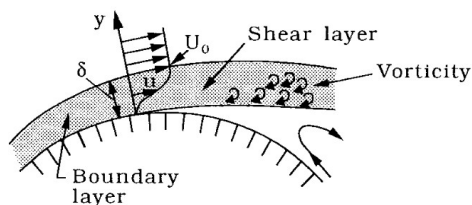


Figura 9. Origem do sentido de rotação da vorticidade (Sumer & Fredsoe, 2006)

A Figura 8 apresenta o comportamento periódico do campo de pressão responsável pelas oscilações nas componentes da força resultante sobre o cilindro, indicadas pela seta F_R , essas alterações periódicas no campo de pressão são consequência do desprendimento de vórtices. Este comportamento origina as oscilações nos coeficientes de arrasto e sustentação das Fig. 5 e Fig. 6. Para cada par de vórtices desprendidos, o coeficiente de sustentação apresenta uma oscilação completa (um período) em torno, aproximadamente, de zero, isto se deve ao fato da força resultante atingir um máximo positivo em y quando o vórtice superior está sendo desprendido e posteriormente um mínimo negativo durante o desprendimento do vórtice inferior. Já o coeficiente de arrasto completa duas oscilações durante o desprendimento de um par de vórtices (dois períodos) em torno de um valor positivo. Isso porque cada vórtice desprendido faz a componente de arrasto atingir um máximo e um mínimo, porém nunca deixando de ser positiva em x , com direção igual a de escoamento.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada a modelagem computacional do escoamento sub-crítico ao redor de um cilindro liso no software OpenFOAM com o modelo $K-\omega$ SST de turbulência. Os coeficientes de arrasto e sustentação, para um escoamento com $Re = 10.000$, são apresentados e discutidos. A visualização dos campos de velocidade e pressão revelam com clareza a região do escoamento perturbado pela presença do cilindro e assim, estruturas que venham a ser posicionadas nessa região devem levar em conta as alterações na velocidade e pressão do escoamento incidente. Além disso, as oscilações do arrasto e da sustentação revelam o comportamento dinâmico dessas forças auxiliando os engenheiros de projeto na previsão das vibrações induzidas no cilindro devido ao escoamento externo. Essas vibrações são conhecidas especificamente como vibrações induzidas por vórtices e deverão ser tratadas em um trabalho futuro. Outra possibilidade de continuidade do estudo é a análise de outros regimes de escoamento e também o posicionamento de mais de um cilindro dentro do mesmo domínio de maneira a obter a influência do escoamento perturbado pela presença de um deles sobre as forças resultantes no(s) outro(s) cilindro(s).

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro e apoio à pesquisa e desenvolvimento no Brasil.

4. REFERÊNCIAS

- Di Zhang, "Comparison of various turbulence models for unsteady flow around a finite circular cylinder at $Re = 20000$ ", Journal of Physics, 910, 2017.
- Fox, R. W; McDonald. A. T; Pritchard, P. J., "Introdução à mecânica dos fluidos", 7a ed., Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- Geuzaine, C. and Remacle, J.-F. cois., 2014, Gmsh Reference Manual.
- Gerrard, J.H., "The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies". J. Fluid Mech, 1966.
- Sangamesh, M.H., Ramesha, D.K., Suman Basu, "Transient simulation of flow past smooth circular cylinder at very high reynolds number using OpenFOAM", Applied Mechanics and Materials, volume 592, pg1972, 2014.
- Sumer, B.M., Fredsoe, J., "Hydrodynamics around cylindrical structures" World Scientific – Advanced Series on Ocean Engineering – Volume 26 (2006).
- Weller, H., Greenshields, C. and de Rouvray, C., "The OpenFOAM Foundation Ltd", OpenFOAM

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES.

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.