

## COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR THE ANALYSIS OF THE FLOW AROUND A SQUARE PRISM IN TURBULENT REGIME

**Mariana Reis Pereira**

**Patricia Habib Hallak**

*mariana.reis@engenharia.ufff.br*

[patricia.hallak@ufff.edu.br](mailto:patricia.hallak@ufff.edu.br)

*Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional, Universidade Federal de Juiz de Fora  
Campus Universitário, 36036 330, Juiz de Fora, MG, Brazil*

**Abstract.** The use of models in Computational Fluid Dynamics (CFD) has been increasing considerably, since the description of the phenomena in an analytical way is sometimes very complex and wind tunnel tests can not always be used. In this research, the characteristics of the turbulent flow around an obstacle of square section, for different Reynolds numbers, were studied, using the computer code in CFD, OpenFoam, which is an open source program in C++ programming language. The choice of the OpenFoam code was due to the fact that is a free open source program and has a great study potential. The square obstacle was chosen because it has similarities with several structures studied by the engineering, that is to say, it is a blunt body with sharp corners and has many already consolidated data. The beginning of the study was done by performing a mesh analysis. For this, a value of the Reynolds number was set and analyzes were carried out with meshes of different refinements in order to evaluate the sensitivity of the mesh. The turbulence model used was the RANS category (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation) and the values of the aerodynamic coefficients found were compared with those obtained in the literature. The most efficient mesh was defined relating the aerodynamic coefficients with the execution time of the analysis and the level of the refinement of the meshes. In a second instance, the Reynolds number were varied and thus the values of the aerodynamic coefficients and their fluctuations were obtained.

**Keywords:** CFD, turbulence model, OpenFoam

### 1 Introdução

Os estudos em dinâmica dos fluidos, dentro da engenharia de estruturas, estão sendo cada vez mais necessários, uma vez que, com o avanço da área e a descoberta de novos materiais, há a necessidade de se avaliar a integridade de estruturas quando sujeitas às ações dos ventos. Isso ocorre porque elas, quando submetidas a esforços aerodinâmicos elevados, podem ter sua estabilidade ameaçada, ou influenciar no conforto dos usuários.

Com o avanço das tecnologias, surgiu a dinâmica dos fluidos computacional (CFD) que, de acordo com Versteeg e Malalasekera [8], é a análise de sistemas envolvendo escoamentos de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados através de simulações computacionais.

Neste trabalho são avaliadas as características aerodinâmicas de um prisma quadrado bidimensional, submetido a um escoamento turbulento. Será utilizado o código computacional em CFD *OpenFoam* para a obtenção destas características.

O trabalho tem como objetivo a avaliação da aplicabilidade de ferramentas computacionais livres em Dinâmica dos Fluidos Computacional para a análise destas características.

## 2 Modelos de turbulência

Um escoamento turbulento é aleatório e instável, ele apresenta flutuações de velocidade que interferem diretamente no transporte de calor, momento e massa, apresentando taxas de difusão bem mais altas do que as apresentadas em um escoamento laminar (Versteeg e Malalasekera [8]).

Escoamentos turbulentos apresentam uma grande quantidade de vórtices em escalas temporais e espaciais. Os vórtices maiores roubam energia do sistema e a transferem para vórtices de menores escalas, criando um processo contínuo de dissipação de energia.

Devido a este comportamento aleatório, a modelagem de escoamentos turbulentos é muito complexa, sendo assim, fez-se necessária a criação de modelos de turbulência específicos para cada situação. No presente trabalho foi utilizado o método das equações de *Navier-Stokes* média (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equation*). Destaca-se o modelo  $k-\omega$  SST, utilizado nas análises.

O modelo  $k-\omega$  SST é uma junção dos modelos  $k-\omega$  e  $k-\epsilon$ . De acordo com Menter [2] o modelo  $k-\omega$  é a escolha para escoamentos com camada limite, porém ele não prevê de forma precisa o comportamento no escoamento livre. Já o modelo  $k-\epsilon$  é bem sucedido em uma grande variedade de fluxos, porém, do ponto de vista aerodinâmico, ele apresenta uma grande deficiência que é a falta de sensibilidade do modelo a gradientes de pressão adversos, prevendo níveis de tensão de cisalhamento muito altos que podem atrasar ou impedir a separação do fluxo (Menter *et al* [3]). Sendo assim, o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST foi proposto para escoamentos aerodinâmicos com gradientes de pressão adversa e separação da camada limite, associando a robustez e precisão do modelo  $k-\omega$  próximo a parede, com a independência do modelo  $k-\epsilon$  no escoamento livre.

## 3 Modelagem numérica

As simulações realizadas neste trabalho foram feitas através do código computacional em CFD *OpenFoam*, que é um software escrito em linguagem de programação C++ que realiza suas discretizações através do método dos volumes finitos. O modelo de turbulência utilizado foi o SST  $k-\omega$  e as simulações tiveram um tempo adimensional inicial  $t^*=0$  e final  $t^*=150$ , o passo de tempo utilizado foi de  $\Delta t=0,001$ . Nas análises foi utilizado um tempo adaptativo para que o número de *Courant* fosse inferior a 1. Como método de discretização da derivada temporal foi utilizado Euler implícito, o termo difusivo foi interpolado linearmente e para o termo convectivo foi utilizada uma interpolação linearUpwind. Na fronteira *Inlet* foi utilizada uma valor fixo de velocidade igual a 1 e na fronteira *Outlet* foi fixada a pressão em 0. Todas as malhas foram geradas através de um gerador de malha externo chamado *gmsH*.

## 4 Análise e resultados

A análise a ser apresentada é referente ao comportamento em torno de um obstáculo quadrado em regime turbulento. A escolha deste corpo se deu pela semelhança de suas características com as apresentadas por diversas estruturas civis, sendo este um objeto rombudo, que apresenta ângulos retos em suas extremidades. A simulação foi realizada para Reynolds  $10^4$  e  $10^6$ .

O quadrado possui lados iguais a uma unidade de comprimento e as dimensões do seu domínio, apresentado na Fig. 1, foram definidas baseadas no trabalho de Sohankar [6]. Para as condições de contorno foram utilizados valores de velocidade e pressão prescritos para cada uma das fronteiras. Para a face definida pelos pontos A-C (*Inlet*) tem-se  $u_1 = u_0$  e  $u_2 = 0$ . Nas faces definidas pelos pontos A-B e C-D aplica-se a condição de  $u_2 = 0$  e na face B-D (*Outlet*) prescreve-se valores de pressão nula. Na superfície do corpo rígido tem-se  $u_1 = 0$  e  $u_2 = 0$ .

Para a escolha da malha a ser utilizada foram rodadas seis malhas diferentes e analisados os resultados dos coeficientes aerodinâmicos em relação ao número de nós, sendo que o aumento do refinamento foi proporcional ao aumento do tempo gasto para a execução da simulação. Estas análises

foram rodadas para um  $Re=10^4$  e os resultados podem ser encontrados na Tabela 1 e comparados aos valores de referência obtidos em diferentes trabalhos.

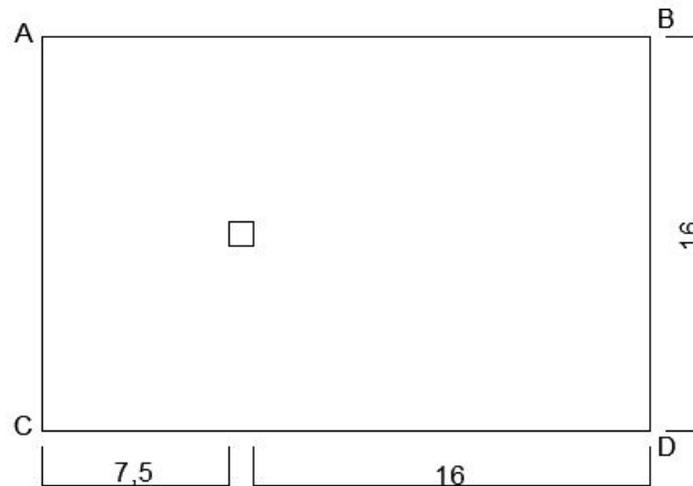


Figura 1. Domínio computacional

Tabela 1. Análise de malhas

Malha	Número de nós	Re	$Cl_{média}$	$Cl_{rms}$	$Cd_{média}$	$Cd_{rms}$	St
1	67350	$1 \times 10^4$	0,07	1,31	2,12	0,30	0,13
2	136644		-0,04	1,37	2,10	0,32	0,13
3	166906		0,02	1,38	2,10	0,26	0,13
4	217524		0,03	1,38	2,14	0,29	0,13
5	253228		0,03	1,42	2,14	0,31	0,13
6	259038		0,00	1,43	2,12	0,29	0,13
Tamura e Kuwahara [7]		$1 \times 10^4$	0,00	1,55	2,2~2,3	-	0,13
Lyn [1]		$1,3 \times 10^4$	-	-	2,16	-	0,13
Oka e Ishihara [4]		$1 \times 10^4$	0,00	1,35	2,05	0,25	-

A malha 5 e a malha 6 apresentaram os melhores resultados quando comparados à literatura, porém, a malha 5 foi escolhida, uma vez que, ela apresentou bons resultados demandando um menor gasto computacional. Esta malha possui seu menor elemento de área na ordem de  $10^{-5}$  e uma razão de aspecto de 2,1258.

Definindo-se a malha 5 como a malha final da simulação, é possível visualizá-la na Fig. 2. Na Fig. 3 é possível visualizar a magnitude dos campos de pressão e de velocidade para o tempo adimensional de  $t^*=150$ . Os gráficos referentes à frequência de Strouhal, coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto podem ser visualizados na Fig. 4.

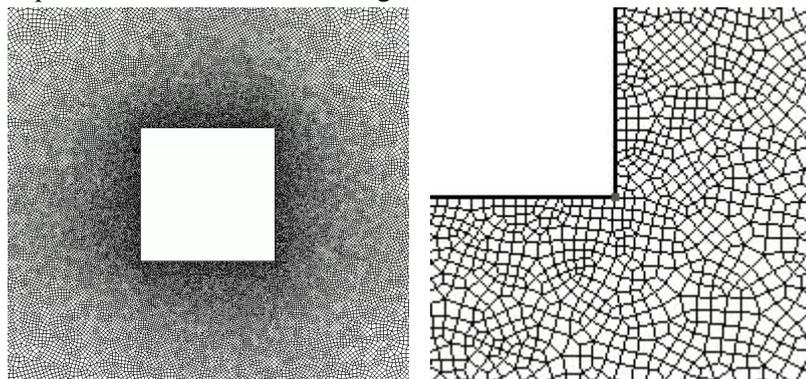


Figura 2. Malha do domínio computacional (Malha 5)

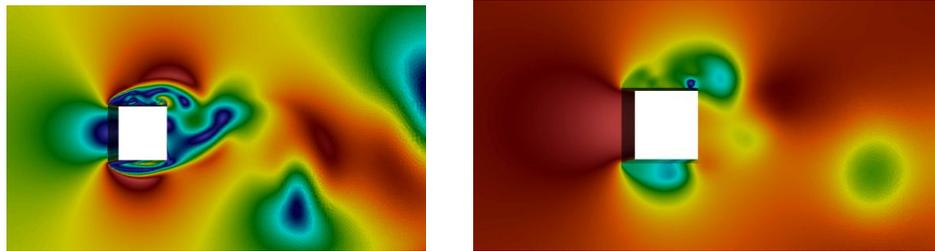


Figura 3. Campo de velocidade e de pressão -  $Re=10^4$  e  $t^* = 150$

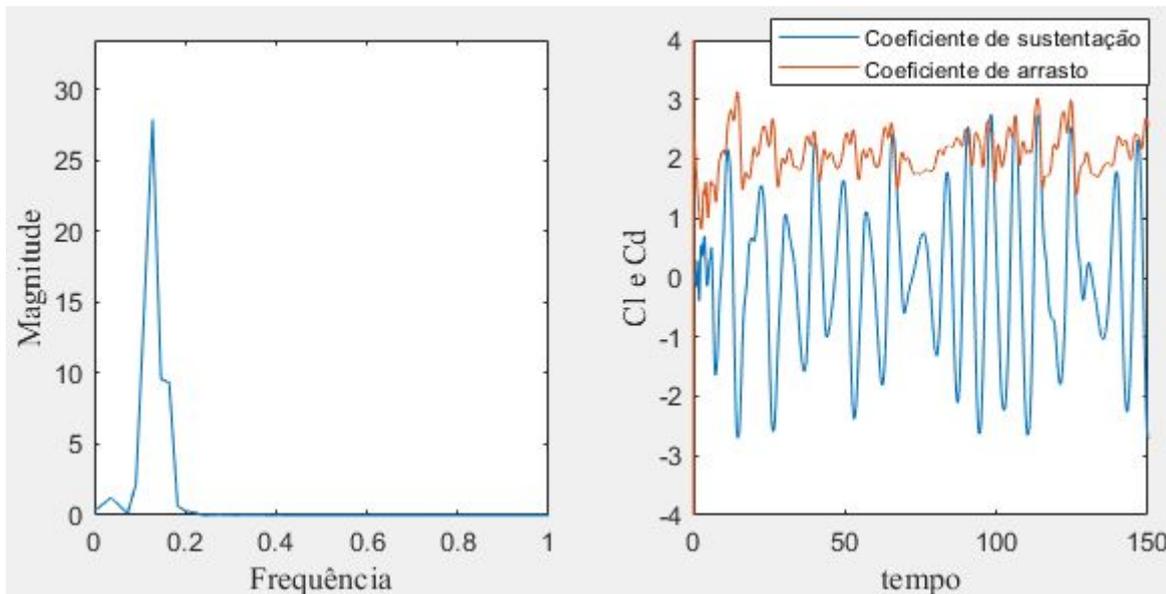


Figura 4. Espectro da força de sustentação e história no tempo dos coeficientes de sustentação e de arrasto -  $Re=10^4$

Assim que a melhor malha foi escolhida, realizou-se uma nova análise para  $Re=10^6$ . Sendo seus resultados apresentados na Tabela 2.

A magnitude dos campos de pressão e velocidade para o tempo adimensional de  $t^*=150$ , são mostrados nas Fig. 5. Os gráficos com as curvas da frequência de Strouhal, coeficiente de sustentação e coeficiente de arrasto para este caso podem ser vistos nas Fig. 6.

Tabela 2. Resultados para  $Re=10^6$

Malha	$Cl_{m\acute{e}dia}$	$Cl_{rms}$	$Cd_{m\acute{e}dia}$	$Cd_{rms}$	St
5	-0,03	1,43	2,12	0,27	0,11
Sohankar [5]	-	1,50	2,30	0,18	0,12

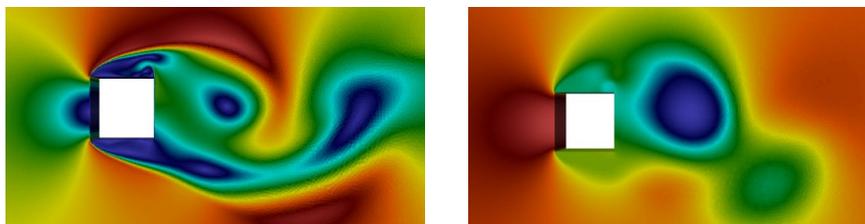


Figura 5. Campo de velocidade -  $Re=10^6$  e  $t^* = 150$

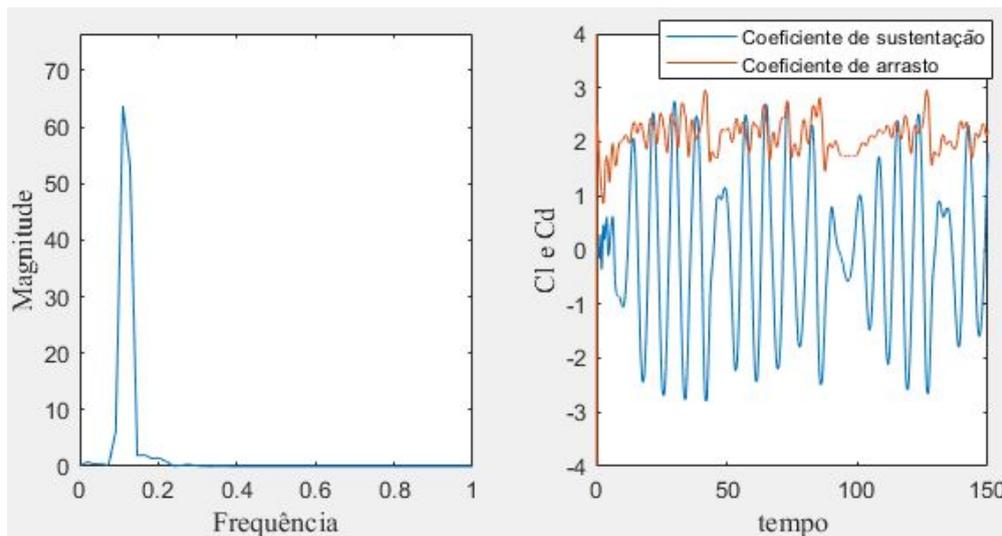


Figura 6. Espectro da força de sustentação e história no tempo dos coeficientes de sustentação e de arrasto -  $Re=10^6$

## 5 Conclusão

As análises realizadas apresentaram uma boa comparação com os dados encontrados na literatura. As divergências apresentadas podem ser devido a malhas diferentes e modelos de turbulência distintos, sendo estas passíveis de serem avaliadas posteriormente. Sendo assim, é possível concluir que o código computacional em CFD *OpenFoam* é uma ferramenta com grande potencial de uso dentro de análises em dinâmica dos fluidos.

## 6 Agradecimentos

As autoras agradecem ao Programa de Pós Graduação em Modelagem Computacional e a UFJF.

## References

- [1] Lyn, D. A. et al. A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 304, p. 285-319, 1995.
- [2] Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, v. 32, n. 8, p. 1598-1605, 1994.
- [3] Menter, F. R.; Kuntz, M.; Langtry, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Turbulence, heat and mass transfer*, v. 4, n. 1, p. 625-632, 2003.
- [4] Oka, S.; Ishihara, T. Numerical study of aerodynamic characteristics of a square prism in a uniform flow. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 97, n. 11-12, p. 548-559, 2009.
- [5] Sohankar, A. Flow over a bluff body from moderate to high Reynolds numbers using large eddy simulation. *Computers & Fluids*, v. 35, n. 10, p. 1154-1168, 2006.
- [6] Sohankar, A. Large eddy simulation of flow past rectangular-section cylinders: Side ratio effects. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, v. 96, n. 5, p. 640-655, 2008.
- [7] Tamura, T.; Kuwahara, K. Numerical study of aerodynamic behavior of a square cylinder. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 33, n. 1-2, 1990, p. 161-170.
- [8] Versteeg, H. K.; Malalasekera, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education, 2007.