



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA  
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS – IEG  
BACHARELADO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**JUSSARA VANESSA SALGADO BATISTA**

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE UM AEROFÓLIO**

SANTARÉM

2017

**JUSSARA VANESSA SALGADO BATISTA**

**SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE UM AEROFÓLIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia para obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia na Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências.

Orientador: Josecley Fialho Goes

SANTARÉM

2017

## **SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE UM AEROFÓLIO: A DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL E O ENSINO.**

Barreto, E. H.<sup>1</sup>, Souza, T. P.<sup>2</sup>, Batista, J. V. S<sup>3</sup>., Góes, J. F.<sup>4</sup>, Coelho, A. C. R<sup>5</sup>

### **Resumo**

Um escoamento aerodinâmico é modelado por Equações Diferenciais Parciais que não admitem solução analítica, entretanto por meio de uma abordagem numérica é possível que uma solução seja conhecida em um domínio discreto. Em suma, isto caracteriza a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). As principais vantagens desta metodologia são a rapidez, a flexibilidade e o baixo custo comparada as técnicas experimentais. Mais recentemente, a DFC tem se mostrado também como uma ferramenta de suporte útil para disciplinas da Mecânica do Contínuo, o que se justifica pela visualização detalhada e informação compreensível que ela pode fornecer aos estudantes, de maneira que eles possam ter um contato direto com uma abordagem prática. Pretende-se nesse trabalho exemplificar conceitos de Mecânica dos Fluidos (MF) a partir da resolução de um escoamento aerodinâmico bidimensional empregando o Método dos Volumes Finitos implementado no OpenFOAM®. A partir dos resultados, fenômenos como camada limite, turbulência, ponto de separação e estagnação são claramente notados. O que mostra como o uso da DFC pode instigar o aprendizado em MF quando utilizada como uma ferramenta de suporte ao ensino.

**Palavras-chave:** Mecânica dos Fluidos, Aerodinâmica, Método dos Volumes Finitos, OpenFOAM.

### **Introdução**

Nas condições de um escoamento aerodinâmico, os fenômenos físicos envolvidos são modelados por Equações Diferenciais Parciais (EDPs). Geralmente, para descrever problemas reais, estas equações assumem a forma não-linear e, portanto, uma solução analítica é inviável. Logo, é necessário o emprego de uma abordagem numérica, considerando condições de contorno e/ou iniciais, permitindo-se que uma solução seja obtida numa região de interesse. As EDPs que governam o escoamento de fluidos são obtidas a partir de balanços de massa e de momento (FOX; MCDONALD, 2011).

Aplicando-se o princípio de conservação da massa a um volume de controle  $dV$ , fixo no espaço e no tempo, tem-se que a taxa de variação da massa em relação ao tempo, no interior do volume de controle, deve ser igual ao fluxo de massa cruzando sua superfície (TU; YEOH; LIU, 2013). Partindo deste pressuposto é possível a dedução da equação da continuidade,

---

<sup>1</sup> PETiano discente, bolsista, do grupo PET Bacharelado Interdisciplinar em Tecnologia da Informação da Universidade Federal de Oeste do Pará, e-mail: [andrew\\_barreto@hotmail.com](mailto:andrew_barreto@hotmail.com).

<sup>2</sup> PETiano discente, não-bolsista, do grupo PET Bacharelado Interdisciplinar em Tecnologia da Informação da Universidade Federal de Oeste do Pará, e-mail: [pstulio@hotmail.com](mailto:pstulio@hotmail.com).

<sup>3</sup> PETiana discente, egressa, do grupo PET Bacharelado Interdisciplinar em Tecnologia da Informação da Universidade Federal de Oeste do Pará, e-mail: [juh.salgadobatista@gmail.com](mailto:juh.salgadobatista@gmail.com).

<sup>4</sup> Colaborador do grupo PET Bacharelado Interdisciplinar em Tecnologia da Informação e docente do curso Engenharia Física da Universidade Federal de Oeste do Pará, e-mail: [josecley.goes@ufopa.edu.br](mailto:josecley.goes@ufopa.edu.br).

<sup>5</sup> PETiana tutora do grupo PET Bacharelado Interdisciplinar em Tecnologia da Informação da Universidade Federal de Oeste do Pará, e-mail: [ana.coelho@ufopa.edu.br](mailto:ana.coelho@ufopa.edu.br).

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

onde  $\rho$  é a massa específica,  $\mathbf{U}$  é o vetor velocidade. Já a equação do *momentum* representa a conservação da quantidade de movimento e pode ser obtida a partir da segunda Lei de Newton. A dedução é feita considerando um elemento  $dV$  cúbico e quantificando as forças agindo em cada face devido às tensões que agem normal e tangencialmente (FORTUNA, 2012). Pode-se, então, escrever a equação do momento na forma:

$$\frac{D\mathbf{U}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \bar{\mathbf{T}} + \bar{\mathbf{g}} = 0 \quad (2)$$

em que  $\bar{\mathbf{T}}$  é o tensor de tensões,  $p$  é a pressão termodinâmica e  $\bar{\mathbf{g}}$  é o vetor gravitacional.

O Método dos Volumes Finitos (MVF) é empregado na discretização do domínio do problema, dividindo-se a região de interesse do escoamento em um número finito de volumes de controle  $dV$ , que serão as células da malha. As formas discretizadas e adaptadas das Eqs. (1) e (2), então, são aplicadas a cada célula com o objetivo de se obter um sistema de equações algébricas lineares, no qual o número de incógnitas corresponderá ao número de células da malha. Esse sistema é então resolvido computacionalmente por um método algébrico.

A solução computacional das equações governantes caracteriza a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC). As principais vantagens do uso da DFC para simulações computacionais são o seu baixo custo e a rapidez na avaliação de diferentes parâmetros, uma vez que testes experimentais em túneis de vento demandam alto custo e tempo na concepção/construção de modelos. Já um estudo numérico permite soluções satisfatórias de maneira relativamente barata e rápida, possibilitando ao projetista analisar diferentes configurações em poucas horas (FORTUNA, 2012).

A atuação da DFC vem revolucionando o aprendizado e o ensino de disciplinas da Mecânica do Contínuo. *Softwares* baseados em DFC podem ser utilizados para que estudantes possam reforçar conceitos explanados teoricamente, já que eles fornecem uma visualização detalhada e informação compreensível dos fenômenos de escoamento (TU; YEOH; LIU, 2013).

Assim, o objetivo deste trabalho é determinar as propriedades aerodinâmicas do escoamento em torno de um aerofólio bidimensional, empregando o MVF através do *software* livre OpenFOAM®. E, a partir dos resultados, destacar visualmente fenômenos conceituados em disciplinas relacionadas à área.

## Metodologia

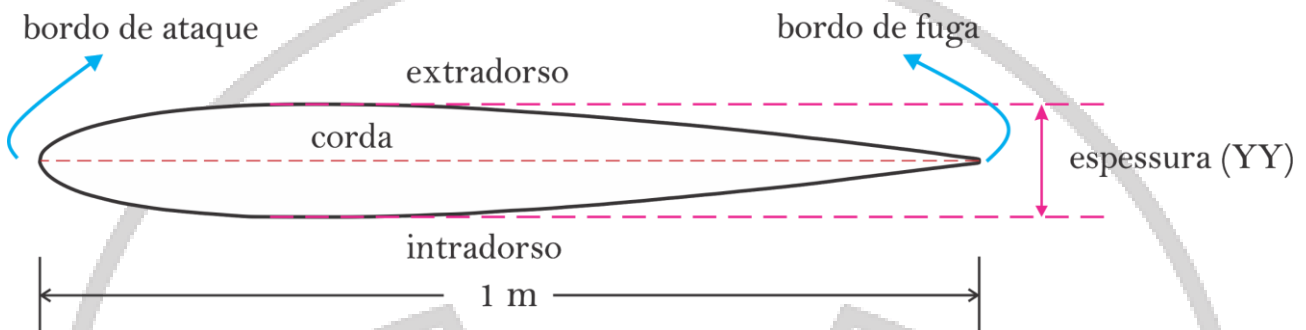
A escolha de um *software* livre é justificada pela necessidade de eliminar gastos com licenças de uso. O OpenFOAM® é uma biblioteca de C++, usada primariamente para criar *executáveis*, que se dividem em duas categorias: *solvers*, desenvolvidos para resolver um problema específico da mecânica do contínuo; e *utilities*, que objetivam realizar tarefas que envolvem manipulação de dados (GREENSHIELDS, 2016). No próprio *software* já há diversos *solvers* e *utilities*, além de vários *case files* prontos para teste, os quais o usuário, com um editor adequado, pode modificar.

Uma simulação computacional se dá em 3 etapas: pré-processamento, solução e pós-processamento. O *pré-processamento* é a etapa em que ocorrem: a) a modelagem matemática do sistema, com a devida discretização das equações envolvidas; b) a definição da geometria a ser simulada; e c) a geração das malhas necessárias. Na etapa de *solução* ocorre a resolução dos sistemas algébricos

originados da discretização das equações. Já o *pós-processamento* é a fase de análise e visualização dos resultados através de ferramentas gráficas; o OpenFOAM® já traz incluso algumas opções, como o *Paraview* e *gnuplot*.

Sobre os aerofólios é importante conhecer dois traçados abstratos: a corda e a linha média. A primeira é uma *linha reta* entre o bordo de ataque e de fuga e a segunda é uma *linha equidistante* entre o extradorso e o intradorso. A nomenclatura dos aerofólios geralmente traz consigo informações (em porcentagem) sobre o perfil. Por exemplo, no NACA XZZZ, o primeiro dígito (X) indica a *distância máxima* da linha média em *relação a corda* e o segundo (Y) indica a *posição*, a partir do bordo de ataque, onde essa distância X ocorre (considerando o comprimento da corda). O último par de dígitos indica a *máxima espessura* do aerofólio relativa ao *comprimento da corda*. Na ilustração da Fig. 1 o NACA 0012 tem uma corda de 1 m e, portanto, 12 cm de máxima espessura.

Figura 1 - Aerofólio NACA 0012

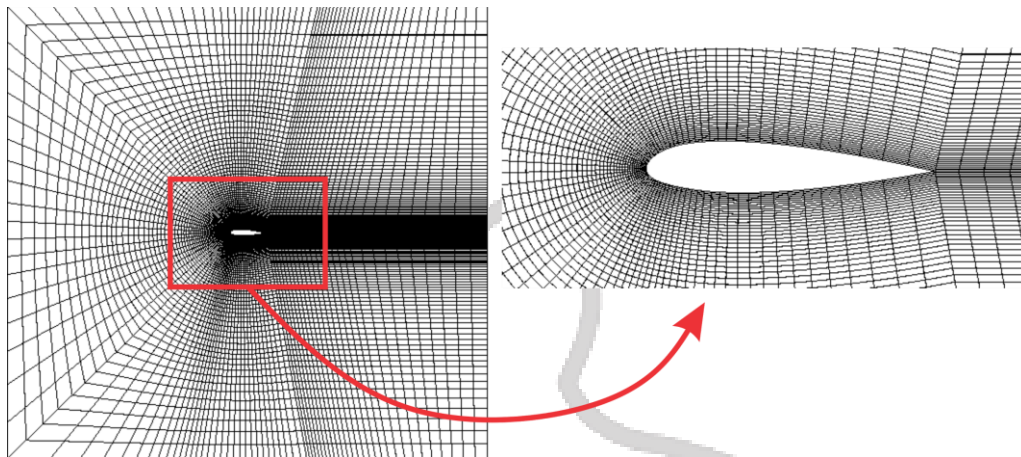


Fonte: Os autores, 2017.

Para a simulação utilizou-se o *case "airfoil2D"* implementado com o *solver simpleFoam*, que é descrito oficialmente como um solucionador para regime estacionário de escoamentos incompressíveis e laminares/turbulentos. A velocidade é de magnitude  $U = 75,66 \text{ m/s}$ , e como o número de Mach é inferior a 0,3 justifica a consideração de incompressibilidade (FOX; MCDONALD, 2011). Por questões de praticidade, para gerar turbulência não se altera a geometria do aerofólio, mas configura-se uma componente de  $U$  na direção  $y$  de maneira que para a mesma magnitude citada acima  $U_y = 20 \text{ m/s}$ , o que equivale a um ângulo de ataque de  $\theta = 15,33$  graus. O ângulo de ataque é aquele formado entre a corda e a linha do horizonte. O número de Reynolds  $3 \times 10^6$ , calculado para 1 m de corda. A massa específica do ar é  $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$  e a viscosidade cinemática  $\nu = 1 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

## Resultados e discussão

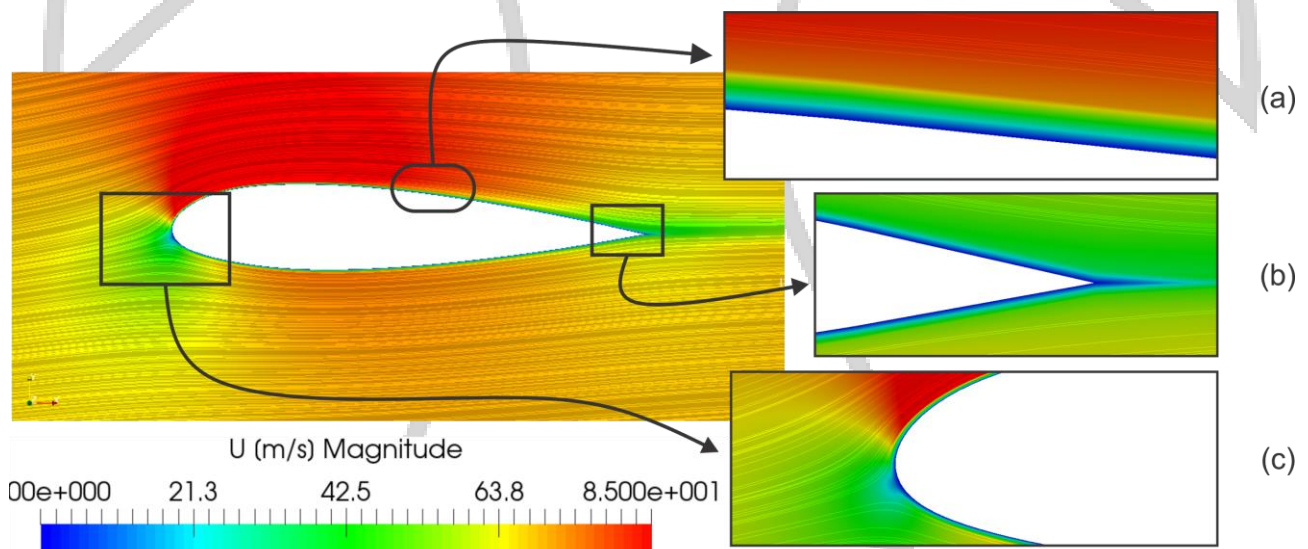
Uma das principais características do *pré-processamento* é a geração da malha. A simulação computacional determina a solução das equações governantes do escoamento somente em determinados pontos do domínio, processo chamado de discretização; por definição, a malha é este "conjunto de pontos discretos nos quais as soluções das equações serão conhecidas" (FORTUNA, 2012). A Fig. 2 ilustra a malha gerada na etapa de *pré-processamento*.



Domínio computacional com 10.720 células de área  $174,08 \text{ m}^2$ . Fonte: Os autores, 2017.

A imagem à esquerda mostra todo o domínio da simulação, com o aerofólio no centro. É possível observar que quanto mais próximo do aerofólio mais refinada a malha se torna, ou seja, passam a haver mais células (volumes de controle  $dV$ ) por unidade de área em torno dele. Isto acontece também na região localizada após o bordo de fuga, como é possível ver no *zoom* (lado direito) da Fig. 2, pois ali espera-se que haja uma perturbação maior do fluxo, gerando assim uma grande variação espacial da solução. Uma malha mais refinada fornecerá resultados mais acurados para regiões onde espera-se grandes variações das propriedades do escoamento. Este refinamento é requisito fundamental para verificar o fenômeno da camada limite, destacado na Fig. 3.

Figura 3 - Estado estacionário do escoamento laminar



Fonte: Os autores, 2017.

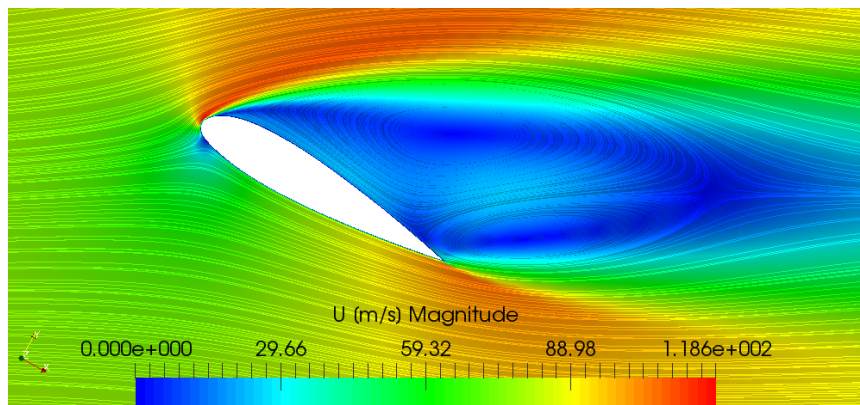
Na Fig. 3 vemos o campo de velocidades do escoamento em torno do aerofólio (à esquerda) e três *frames* obtidos pela ampliação de regiões específicas do aerofólio, que mostram os fenômenos do ponto de estagnação, da camada limite e da região de separação. É possível observar a existência de uma diferença na faixa de velocidades no extradorso e no intradorso do aerofólio, diferença esta

causada devido a diferença de pressão nessas duas regiões. A pressão na parte inferior do aerofólio é maior que na parte superior, fenômeno este que, apesar de ainda não ser claramente explicado pela literatura, é o causador do empuxo necessário à sustentação dos aviões no ar. O princípio de Bernoulli estabelece que pressão e velocidade são inversamente proporcionais, logo, com uma pressão maior atuando na região do intradorso haverá ali velocidades inferiores à zona do extradorso.

O *frame (c)* mostra o chamado ponto de estagnação (pequena região azul) que ocorre no bordo de ataque do aerofólio. O *ponto de estagnação* é o ponto onde o fluido incide, se choca com o aerofólio e, nesse exato ponto, se divide em duas direções, escoando ao redor do aerofólio em camadas coladas ao extradorso e ao intradorso; neste ponto a velocidade é nula e a pressão é máxima. O *frame (a)* é um *zoom* da região média do extradorso; através das cores é possível verificar a variação da velocidade próximo a superfície do aerofólio. De acordo com Fox e McDonald (2011) um fluido escoando sobre uma superfície sólida adere à superfície formando uma *camada limite*; fora desta camada limite o escoamento é uniforme (região vermelha), contudo no interior da camada limite há um gradiente de velocidade, em que aquele fluido em contato com a superfície tem velocidade nula (faixa azul) e conforme se afasta desta superfície ocorre um aumento gradativo da velocidade, até que se esteja na região limite onde a velocidade é do escoamento em relação à superfície ( $U_\infty$ ). A camada limite no aerofólio surge a partir do ponto de estagnação. O *frame (b)* mostra outra região crítica do escoamento, onde ocorre a separação das camadas de fluido coladas ao aerofólio que se originaram no ponto de estagnação. Nesta região, já próxima ao bordo de fuga o momento linear do fluido na camada limite já não é suficiente para o transportar adiante, então as camadas adjacentes à superfície entram em repouso e as partículas descolam-se do aerofólio. Essa separação da camada limite ocasiona uma região de baixa pressão na região à jusante do aerofólio, chamada de *esteira*, onde a velocidade é relativamente baixa comparada com o restante do escoamento. Uma classificação muito difundida do escoamento de fluidos é quanto a ele ser laminar ou turbulento.

Fox e McDonald (2011) ensinam que num *regime laminar* a estrutura do escoamento é caracterizada pelo movimento suave em lâminas ou camadas e é exatamente isso que se verifica na Fig. 3, um escoamento perfeitamente organizado em camadas que se sobrepõem umas às outras. Isto se torna bem perceptível na imagem pelo comportamento das *streamlines* geradas pelo Paraview. *Streamlines* são as linhas de corrente do escoamento, elas são tangentes aos vetores de velocidade instantâneos das partículas do fluido e por isso nunca se cruzam (FORTUNA, 2012). Já o *escoamento turbulento* é definido pelos autores como aleatório e caótico, com as partículas fluidas se movimentando desordenadamente, o que pode ser visto da Fig. 4, o escoamento nesse caso é intensamente perturbado pela geometria, e a solução do problema varia bastante a cada *passo de tempo* (o solucionador não converge). Vale destacar também a mudança no ponto de estagnação e a posterior separação da camada limite no bordo de ataque, o que transforma região do extradorso numa zona de recirculação.

Figura 4 - Escoamento em condições de turbulência



Fonte: Os autores, 2017.

## Conclusão

Escoamento laminar e turbulento, linhas de corrente, ponto de estagnação, região de separação e camada limite são conceitos abordados em sala de aula, em boa parte das situações, simplesmente de forma teórica. Mostrou-se neste trabalho que além de tais fenômenos, leis e princípios físicos que são conteúdo programático, geralmente, da disciplina de Mecânica dos Fluidos podem ser abordados, com o auxílio de ferramentas computacionais (a partir de um caso problema). Ressalta-se que é possível a modelagem e tratamento de outros problemas específicos, a fim de se analisar diversos fenômenos. Isto mostra que a DFC, além de ter aplicação na pesquisa, pode ser usada de forma bem abrangente no ensino, pois como vimos, produz informações bem intuitivas que podem tornar o aprendizado mais atraente para os estudantes. Além disso, trata-se de uma abordagem prática, o que é fundamental para o desenvolvimento do raciocínio lógico necessário a resolução de problemas reais de engenharia.

O desenvolvimento de pacotes de *softwares* livres baseados em DFC, a exemplo do OpenFOAM®, torna viável sua utilização em instituições públicas de ensino. O que vai de encontro ao Art. 2º da portaria 976 de 2010, do MEC, que estabelece a indissociabilidade do Ensino, Pesquisa e Extensão como uma das diretrizes do PET. Por isto, como perspectiva futura temos a confecção de tutoriais para simulação de *cases* básicos, alguns já implementados no OpenFOAM®. Esses tutoriais serão disponibilizados na página do grupo como proposta de atividade nos cursos de graduação contemplados por este PET.

## Referências Bibliográficas

- FORTUNA, A. d. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. 542 p.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 7. ed. LTC: Rio de Janeiro, 2011.
- GREENSHIELDS, Christopher J. **OpenFOAM, The OpenFOAM Foundation. User Guide**, version 4.0. CFD Direct Ltd, 2016.
- TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics: A practical approach**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2013.