



**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.¹, Souza, T. P.², Batista, J. V. S³., Góes, J. F.⁴, Coelho, A. C. R⁵

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,

¹ 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.

² 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.

³ 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.

⁴ 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.

⁵ 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.

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

onde ρ 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

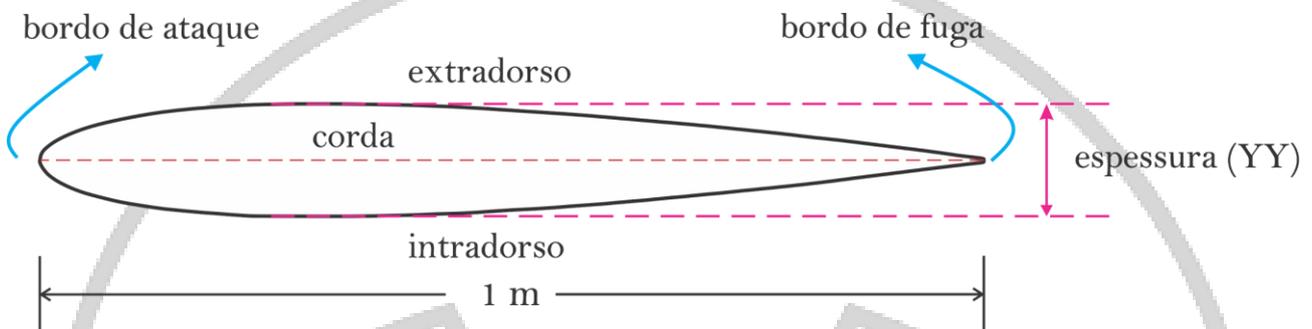
A escolha de um *software* livre é justificada pela necessidade de eliminar gastos com licenças de uso. O OpenFOAM® é uma biblioteca de C++, usada primariamente para criar *executáveis*, que se dividem em duas categorias: *solvers*, desenvolvidos para resolver um problema específico da mecânica do contínuo; 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

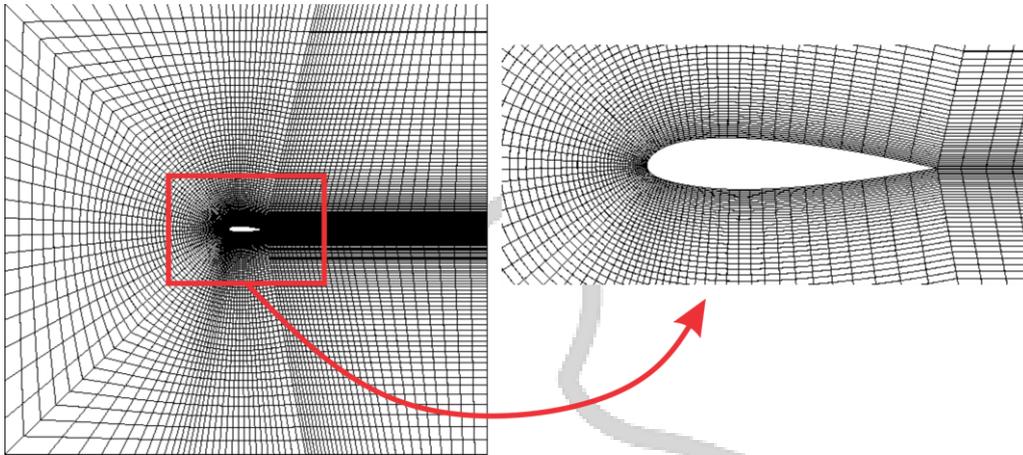


Fonte: Os autores, 2017.

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 3×10^6 , 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

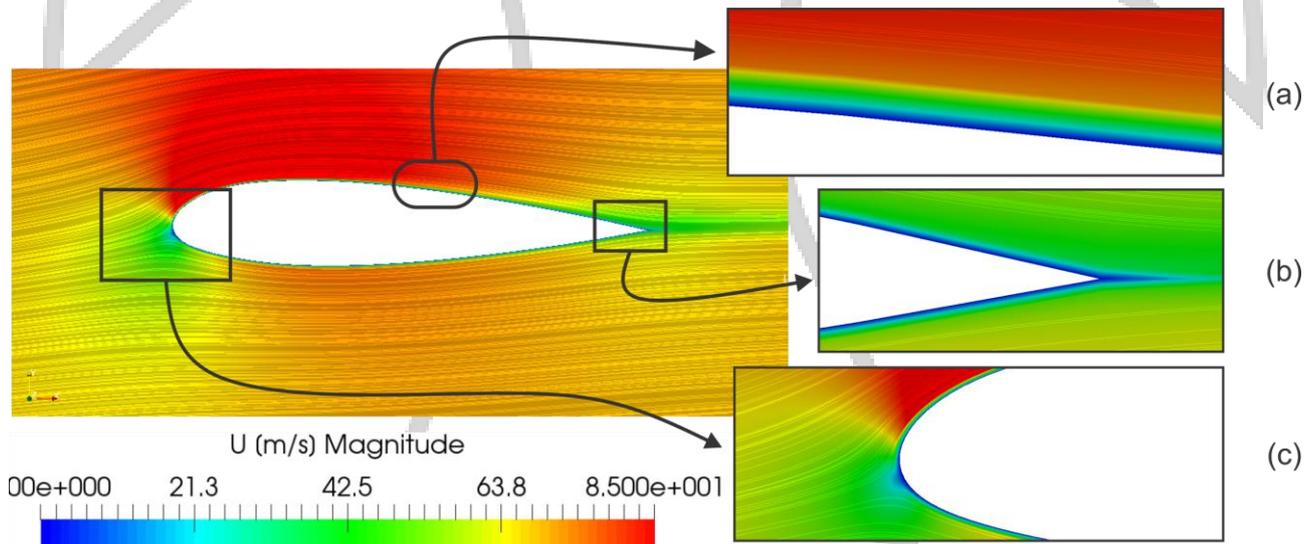
Uma das principais características do *pré-processamento* é a geração da malha. A simulação computacional determina a solução das equações governantes do escoamento somente em determinados pontos do domínio, processo chamado de discretização; por definição, a malha é este "conjunto de pontos discretos 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.

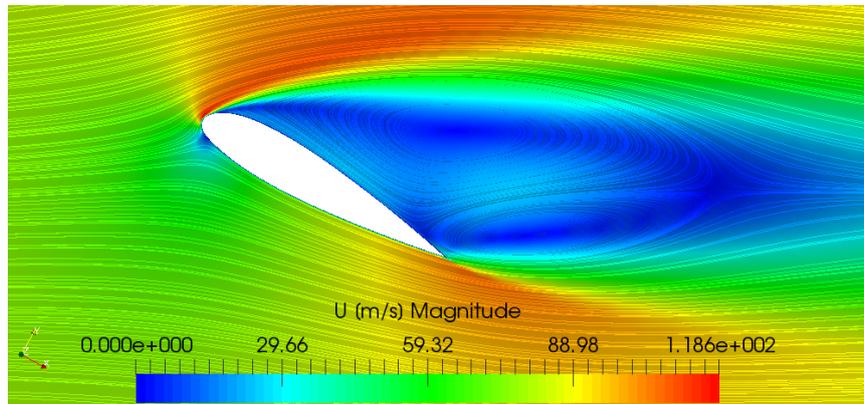
Na Fig. 3 vemos o campo de velocidades do escoamento em torno do aerofólio (à esquerda) e três *frames* obtidos pela ampliação de regiões específicas do aerofólio, que mostram os fenômenos do ponto de estagnação, da camada limite e da região de separação. É possível observar a existência de uma diferença 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_∞). 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.