

## ANÁLISE NUMÉRICA DE UM PERFIL AERODINÂMICO UTILIZANDO A PLATAFORMA *OpenFOAM*

João de Sousa Bomfim Neto (UNIFOR) joaodesousa1@gmail.com

Luana Sousa Silva (Universidade de Fortaleza - UNIFOR) luusousa17@gmail.com

Francisco de Assis Leandro Filho (Instituto Federal do Ceará - IFCE) leandro.filho@ifce.edu.br

Daniel Barros de Freitas (Universidade de Fortaleza - UNIFOR) danielbfreitas@unifor.br

Brígida Miola Rocha (Universidade de Fortaleza - UNIFOR) bmiola@unifor.br

Bruno Aragão Martins de Araújo (Universidade de Fortaleza - UNIFOR) aragao@unifor.br

**Resumo:** A mecânica dos fluidos é uma das áreas mais abrangentes nas engenharias, sendo, quase sempre, um dos primeiros contatos do graduando com uma disciplina específica. Sua aplicação vai desde a multiplicação de força em um braço hidráulico pelo princípio de Pascal à construção de grandes barragens. O presente trabalho está inserido na subárea da mecânica dos fluidos que estuda o comportamento de corpos imersos em escoamento não estacionário, a Dinâmica dos Fluidos Computacional, ou CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Neste caso, foi analisado um perfil aerodinâmico utilizando a plataforma livre OpenFOAM para as simulações e visualização do comportamento das camadas de fluido. O perfil aerodinâmico e seu respectivo domínio foram criados no software livre de CAD gerador de malhas GMSH, para posterior importação para o OpenFOAM.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica. CFD. OpenFOAM.

## NUMERICAL ANALYSIS OF AN AERODYNAMIC PROFILE USING THE *OpenFOAM* PLATAFORM

**Abstract:** Fluid mechanics is one of the most comprehensive areas in engineering, being, often, one of the first contacts of the graduate with a specific discipline. Its application range from the multiplication of force in a hydraulic arm by the principle of Pascal to the construction of great dams. This work is a part of the fluid mechanics area, that studies the behavior of bodies immersed in non-stationary flow, computational fluid dynamics, or CFD. An aerodynamic profile was analyzed using the OpenFOAM free platform for the simulations and preview of the fluid layers behavior. The aerodynamic profile and its respective domain were created in the free CAD software mesh generator GMSH, for subsequent import to OpenFOAM.

**Keywords:** Aerodynamics. CFD. OpenFOAM

### 1. INTRODUÇÃO

A Mecânica dos Fluidos é a ciência que estuda o comportamento dos fluidos, bem como as leis que regem esse comportamento. A gama de aplicações da mecânica dos fluidos na engenharia é bastante ampla, como por exemplo, o estudo de máquinas hidráulicas, esforços em barragens, ventilação e aerodinâmica. Dentro desta vasta ciência, o presente estudo se concentra em escoamentos externos, que são escoamentos sobre corpos imersos em um fluido sem fronteira. O escoamento sobre uma esfera ou sobre um corpo carenado são exemplos de escoamento externo (FOX, 2009).

O estudo de escoamentos externos é de alta importância para a engenharia aeronáutica, de forma a analisar o escoamento do ar em vários componentes de uma aeronave. Boa parte do conhecimento que se têm hoje acerca do assunto foi desenvolvido a partir da resolução de problemas de aerodinâmica, contudo, existem diversas áreas de interesse na aplicação de

conhecimentos relativos ao escoamento externo como o escoamento em torno de uma pá de uma turbina; escoamento sobre a superfície de um automóvel; escoamento de transporte de glóbulos vermelhos, escoamento sobre edificações; dentre outros (POTTER, 2004).

A análise de efeitos aerodinâmicos em mecânica dos fluidos é algo complexo e requer muito conhecimento específico. As leis físicas que governam os fenômenos associados à aerodinâmica recaem numa matemática um tanto complexa, com várias equações diferenciais parciais geradas a partir de simplificações das equações de Navier-Stokes, tornando a análise analítica impraticável, pelo menos em situações específicas onde o tempo é limitado. Outro modo de análise é o experimental, de forma que em um túnel de vento adaptado à situação se consegue levantar os dados necessários à análise, podendo ser incrementado ainda o uso de sensores. Este, porém, pode se tornar demasiado caro, pois, para grandes perfis seriam necessários grandes túneis de vento, o que ainda necessitaria de grandes instalações, tornando o processo dispendioso.

Para se realizar uma análise que se entre num meio termo entre os dois exemplos citados acima se recorrem aos métodos numéricos computacionais, onde é necessário certo grau de dedicação mental e se ter um aparato computacional razoável e compatível com o problema em questão, sendo que, por métodos numéricos computacionais o tempo gasto é consideravelmente menor do que na resolução de equações e muito menos dispendioso do que o método experimental. Contudo, este método só existe e é possível utilizá-lo porque é conhecida a física-matemática do problema e há a possibilidade de experimentação posterior, afim de comprovar o resultado numérico

Dinante do exposto, este trabalho tem como objetivo analisar um perfil aerodinâmico usando apenas um computador com o sistema operacional Linux Ubuntu® e conhecimentos relativos aos fatores físicos envolvidos com a dinâmica do escoamento e visualizando simulações com foco no perfil imerso.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Definição de Fluido**

Comparando a um sólido, pode-se ressaltar a definição de fluido a partir de sua forma. Um sólido tem uma forma própria, enquanto um fluido tem forma indefinida, dada de acordo com o recipiente que o contém (BRUNETTI, 2008). Essa é uma definição generalista, que orienta sobre a identificação do que é um fluido.

Contudo, em relação à um sólido, deve haver uma distinção mais específica, associada à forças e tensões aplicadas, a saber, como estes atingem (ou não) o equilíbrio após aplicadas essas forças e tensões. Essa distinção é obtida a partir da clássica “experiência das duas placas” (Figura 1), onde um sólido é colocado entre as duas placas e posteriormente um fluido (a), ambos sujeitos à uma força tangencial (b) na placa superior, estando a inferior engastada.

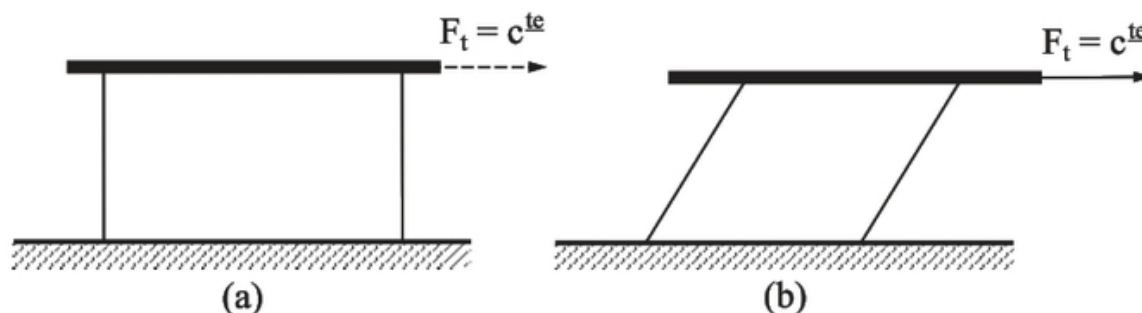


Figura 1. Experimento das duas placas planas

Observa-se que ao aplicar uma força pequena em um sólido este sofre uma pequena deformação angular e atinge uma nova posição de equilíbrio estático, diferente de um fluido, que se deforma continuamente, não se encontrando posteriormente em uma nova configuração de equilíbrio estático enquanto a força constante é aplicada.

## 2.2 Fluido Ideal e Escoamento Incompressível

Pode ser considerado fluido ideal aquele que não resiste ao escoamento, ou seja, tem viscosidade nula. Com isso o fluido não perde energia por atrito. Obviamente, não existe este tipo de fluido, no entanto para análises menos minuciosas ou em situações hipotéticas, convém adotar o fluido de trabalho como ideal.

Caso onde o fluido não tem seu volume variado com a variação de pressão, consequentemente do tempo. Matematicamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Na realidade esta condição inexistente. Fluidos líquidos, porém, têm comportamento muito próximo ao caso em questão e os gases também, desde que não sofram pressões grandes. Logo, para fluidos e gases em baixas pressões, a incompressibilidade é uma condição aceitável

### 2.3 Dinâmica dos Fluidos

A Dinâmica dos Fluidos trata em estudar a interação entre um corpo e um meio fluido no qual o corpo está imerso, existindo entre eles um movimento relativo e, adotando como referencial, o corpo (sólido). Sendo assim, não importa se apenas o corpo ou fluido, ou ambos, estão em movimento; para o observador o sólido estará sempre em repouso e o fluido escoará contra o corpo.

Graças a impenetrabilidade do sólido, é visível que a massa de fluido em escoamento seja perturbada nas adjacências do corpo. O movimento de contorno da massa escoante na superfície do sólido provocará o aparecimento de uma força, que, caso seja analisado o sólido de perfil de modo a possibilitar a decomposição em duas componentes, estas são (Figura 2):

- Resistência ao avanço ou força de arrasto ( $F_a$ ), paralelas às linhas de corrente do escoamento;
- Força de sustentação ( $F_s$ ), que é a componente normal ou perpendicular às linhas de corrente.

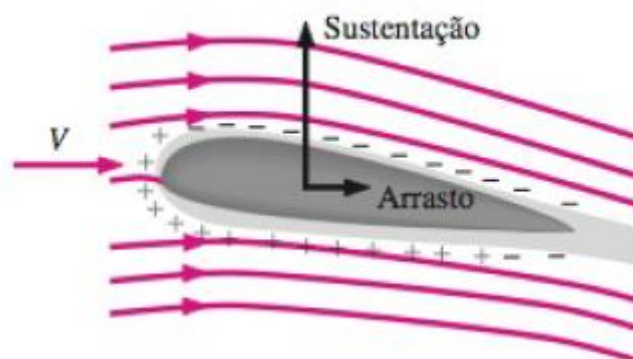


Figura 2. Forças de arrasto e sustentação atuando sobre um corpo carenado.

Porém, para o desenvolvimento de estimativas dessas forças (geralmente são determinadas de maneira empírica), algumas hipóteses são assumidas, de forma a facilitar o trabalho:

- Fora do campo de perturbação, as linhas de corrente são paralelas;
- Fora do campo de perturbação, o diagrama de velocidades é uniforme;
- O escoamento é não-transiente;
- O fluido é incompressível;
- As diferenças de cotas não influenciam na determinação das diferenças de pressão.

## 2.4 Número de Reynolds

No estudo de escoamento de fluidos é conveniente correlacionar o máximo possível de variáveis em uma só, de forma a simplificar os cálculos e economizar tempo e pesquisa. Esse é o objetivo da adimensionalização de parâmetros. A correlação de variáveis pode ser escrita como razão entre os diversos tipos de forças que um fluido sofre durante o escoamento (POTTER, 2004). São algumas delas:

### Força de Pressão:

$$F_p = \Delta p A \approx \Delta p l^2 \quad (2)$$

### Força Viscosa:

$$F_\mu = \tau A = \mu \frac{dv}{dy} A \approx \mu \frac{v}{l} l^2 = \mu l v \quad (3)$$

### Força Inercial:

$$F_I = m v \frac{dv}{ds} \approx \rho l^3 v \frac{v}{l} = \rho l^2 v^2 \quad (4)$$

Ainda existindo forças centrífuga, de compressibilidade, etc.

Onde:

$l$  = Comprimento do elemento

$m$  = Massa

$s$  = Superfície

$v$  = Velocidade do escoamento

Observou-se que a laminação ou turbulência do escoamento era função da força de inércia e da força viscosa. Quão maior fosse a força a força inercial em relação à força resistente ao escoamento, ou seja, a força viscosa, mais o escoamento tenderia ao regime turbulento. Assim, foi dada origem ao Número de Reynolds (Re), como a razão entre as duas forças acima mencionadas:

$$\text{Re} = \frac{F_I}{F_\mu} = \frac{\rho l^2 v^2}{\mu l v} = \frac{\rho l v}{\mu} = \frac{l v}{\nu} \quad (5)$$

A partir dos valores do  $Re$  existe a possibilidade de previsão do regime do escoamento do fluido. O valor de referência para a transição do escoamento para turbulento é denominado Número de Reynolds Crítico ( $Re_{crit}$ ), sendo um  $Re > Re_{crit}$  um escoamento turbulento. O escoamento pode ainda apresentar intermitência laminar-turbulenta, o que acontece geralmente para valores menores e próximos à  $Re_{crit}$ .

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

O OpenFOAM (originalmente FOAM) foi criado por Henry Weller no final de 1980, com o objetivo de realizar simulações mais flexíveis e capazes que as realizadas pelos softwares da época, que utilizavam FORTRAN como linguagem. A plataforma é predominantemente CAE (*computer aided engineering*), ou seja, é destinado a fazer simulações e testes relativos à problemas de engenharia e utiliza linguagem de programação C++. Sendo assim, o software necessita de um modelo em CAD (*computer aided design*) já pronto com sua devida *mesh* ou malha processada em elementos finitos (2D) ou volumes finitos (3D), de forma que esta é convertida e importada para o software para a realização da análise numérica.

Para esta simulação, inicialmente foi criado uma malha de um aerofólio usando o pacote GMSH. As malhas foram criadas através do perfil NACA 5012 (Figura 3).

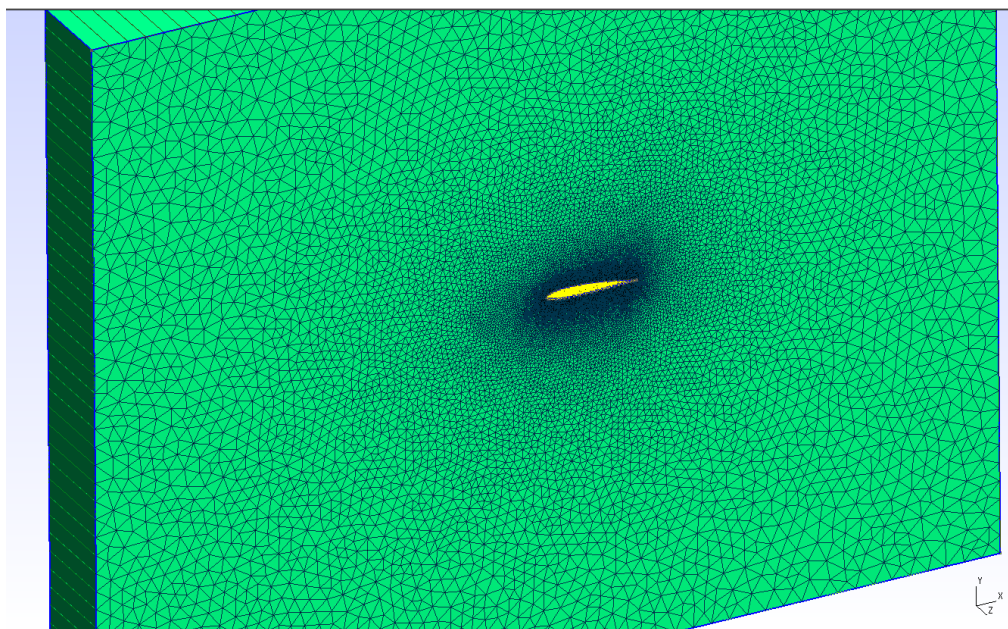


Figura 3. Aerofólio “malhado” com elementos finitos (visualização isométrica).

A malha tem mais pontos perto da superfície e menos perto dos limites. Isto é controlado pelo comprimento característico dos vários pontos que foram definidas, para ser de 0,005 para as superfícies de aerofólio e 0,2 para as bordas.

Após a exportação da malha, foi feita a simulação do escoamento externo de um fluido através da plataforma *OpenFOAM*. Feita a modelagem computacional do problema físico e simulações, alguns dados foram extraídos e plotados em gráficos usando o software *GNUPLOT*.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para se visualizar o perfil, algumas imagens foram geradas via *Print Screen*, sendo estas imagens na décima leitura do programa, no tempo final (500 s) e estando o perfil com uma inclinação de oito graus em relação ao vento relativo (o ar é o fluido de escoamento, para este caso):

Para o contorno de pressão:

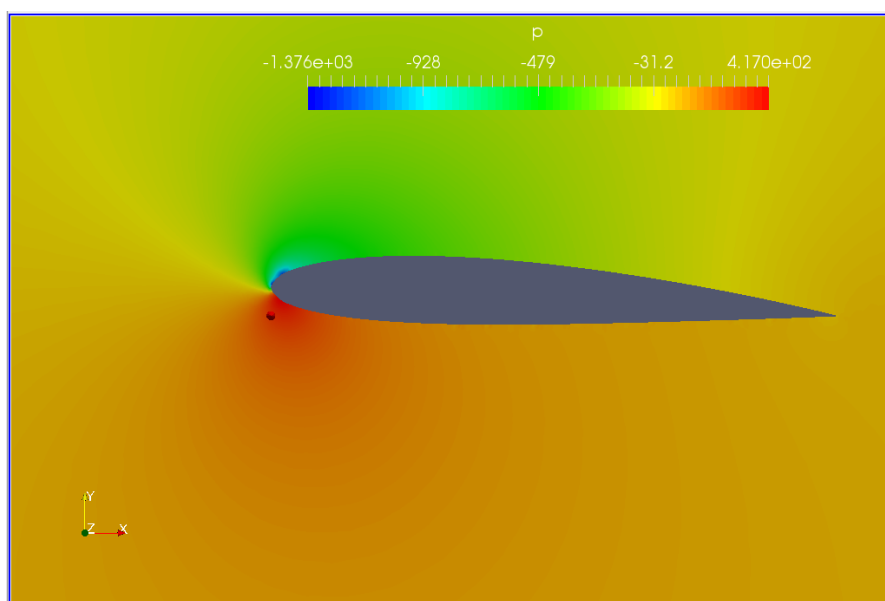


Figura 4. Campo de pressão ao redor do perfil, com escala e em vista bidimensional.

Para a velocidade resultante:

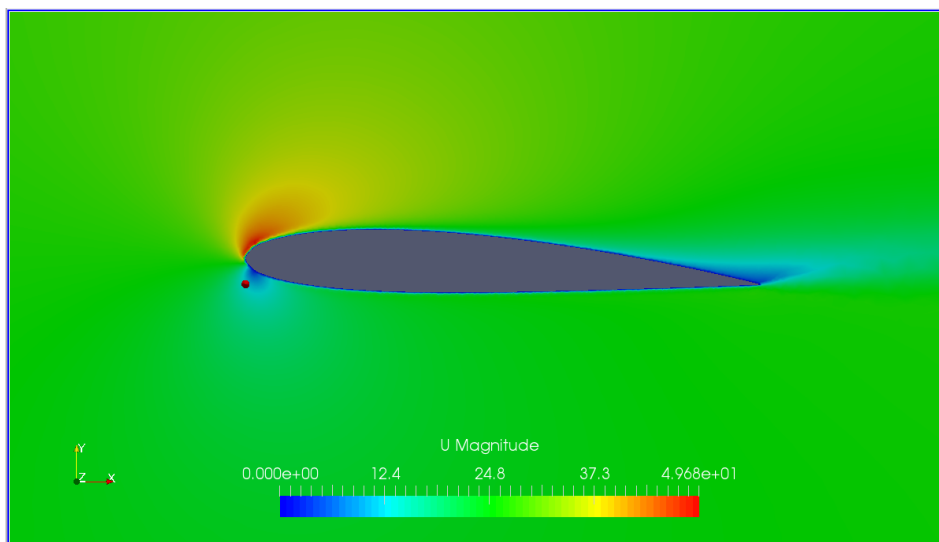


Figura 5. Campo de velocidades ao redor do perfil, com escala e em vista bidimensional.

Para a visualização dos contornos de pressão, podemos verificar a simulação na figura 6:

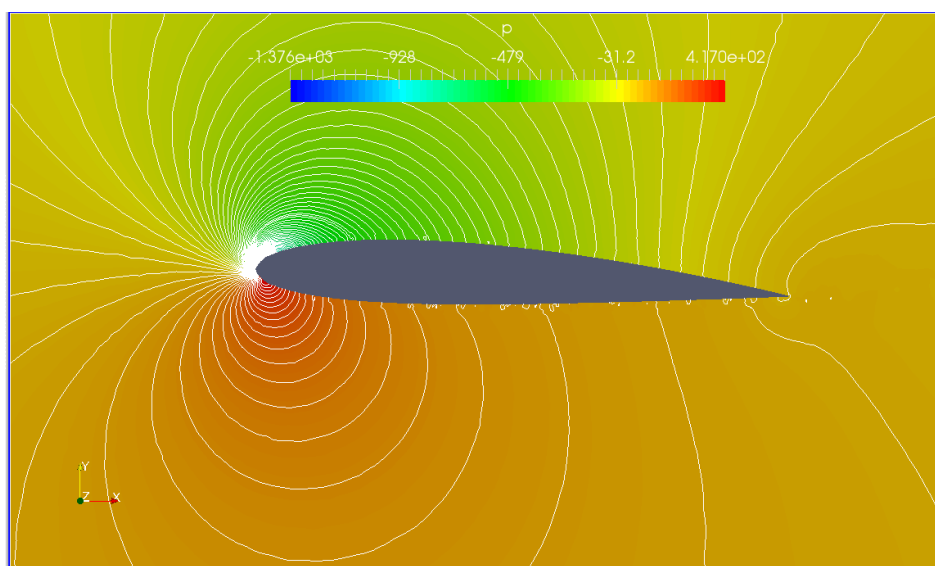


Figura 6. Contornos de pressão do escoamento.

Ainda é possível ter uma visualização 3D da superfície do perfil e ver a distribuição de pressão sobre este. No extradorso:



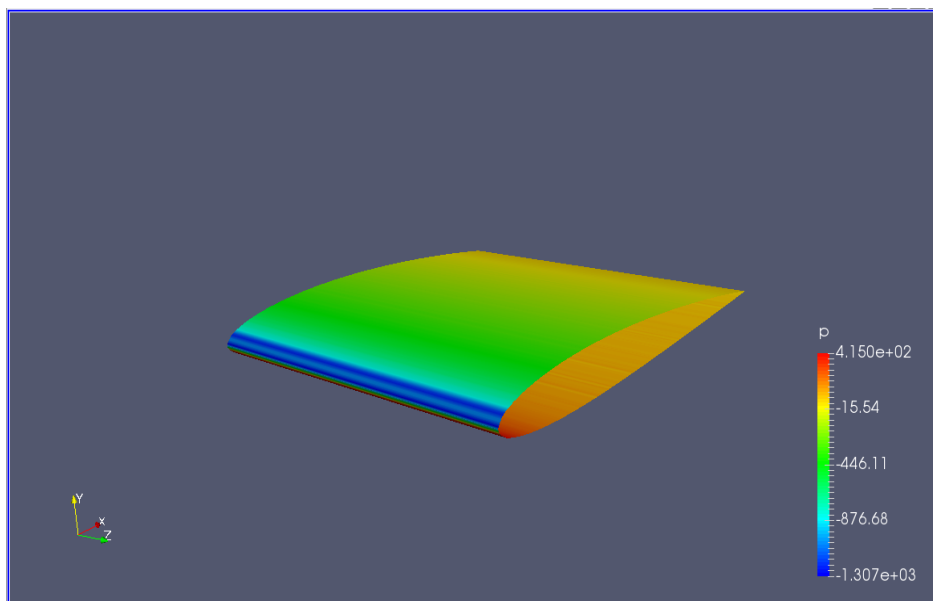


Figura 7. Pressão no extradorso do aerofólio, com escalas e em 3D.

No intradorso:

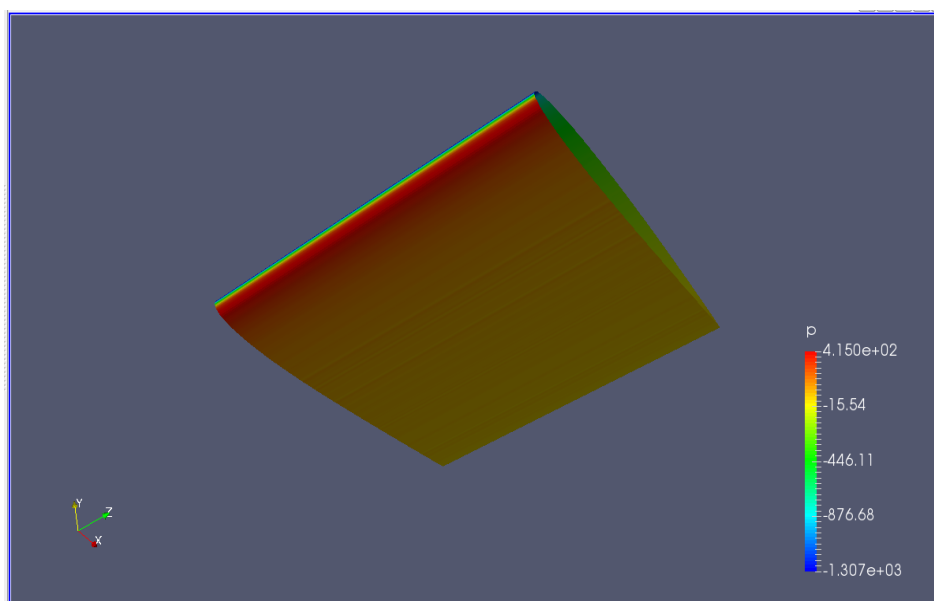


Figura 8. Pressão no intradorso do aerofólio, com escalas e em 3D.

Fonte: Própria (2016).

E por último, dentro do *ParaView*, pode-se também plotar um gráfico em tempo real das grandezas físicas que se queira. Na figura 9, o gráfico é relativo a uma seção imediatamente perto do bordo de ataque, indicada pela linha vertical branca:

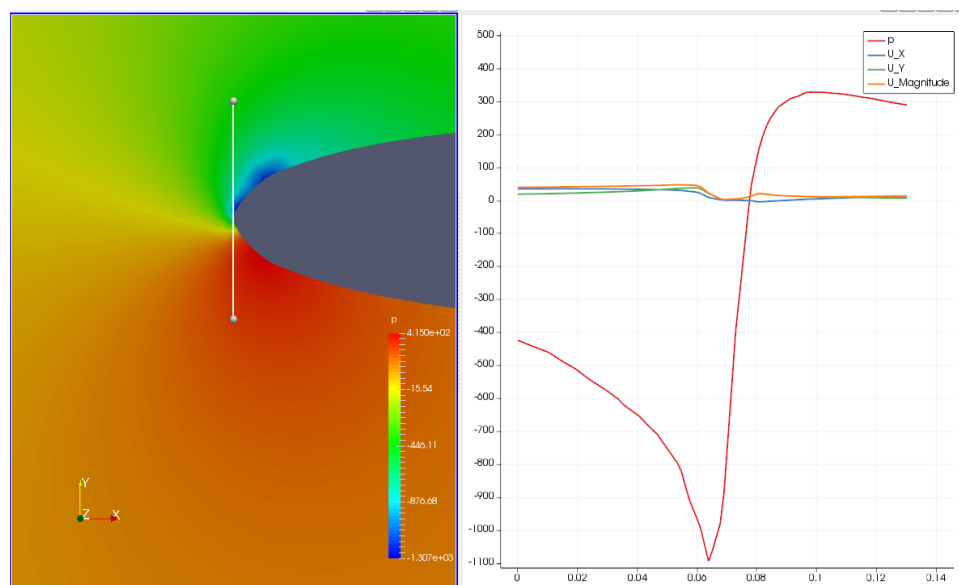


Figura 9. Gráficos de velocidade e pressão em tempo real (simultâneos à simulação)

Os dados de convergência de pressão e velocidade foram plotados com relação aos pontos mencionados na seção onde foi mostrada a alteração do *controlDict*. Os dados de força de arrasto e sustentação foram plotados com os dados obtidos devido à alteração no *controlDict*. Os gráficos que seguem foram plotados com o programa GNUPLOT, através de *scripts* desenvolvidos para adequar os dados extraídos em *.dat* ao programa.

As figuras 10 a 12 retratam a saída dos dados de força e campos de pressão e velocidade, bem como sua convergência.

Forças:

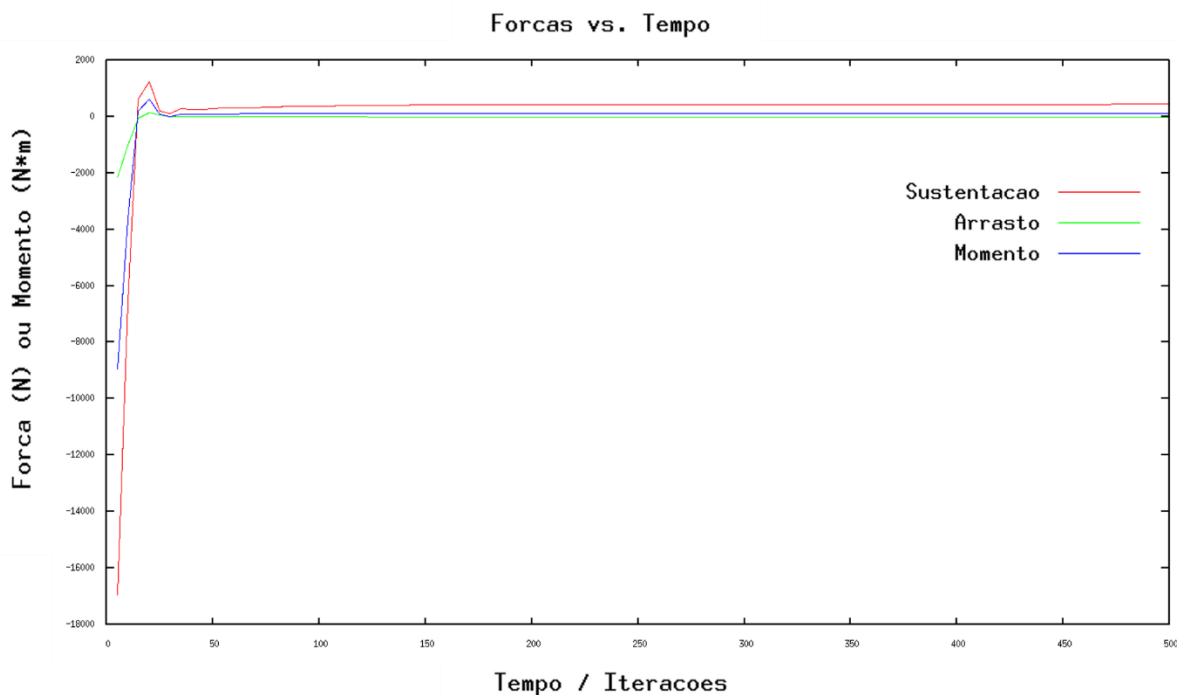


Figura 10. Forças x Tempo

O gráfico acima mostra a curva de força e seu desenvolvimento em relação à cada iteração ou passo de tempo (sabendo que cada passo de tempo vale 1 s, então cada iteração vale 1 s, podendo ser verificado no arquivo *controlDict*). O comportamento da curva de sustentação condiz com a física, pois no momento inicial do escoamento, o choque de fluido com o perfil (inclinado levemente para cima) faz com que este tenha uma força gerada para cima (sustentação positiva), atingindo um pico e sendo estabilizada ao passo que o escoamento também se estabiliza.

O arrasto mostra um desenvolvimento inicial e mantém uma constância logo em seguida, não apresentando um pico, como a sustentação, devido à baixa inclinação do perfil (oito graus) e ao fato de este ser carenado (baixo efeito do arrasto). O momento indicado refere-se a força resultante agindo sobre um braço de alavanca ao longo do corpo, algo não interessante para este trabalho.

A seguir, é mostrado a convergência de pressão e velocidade nos pontos sonda (*probes*), respectivamente:

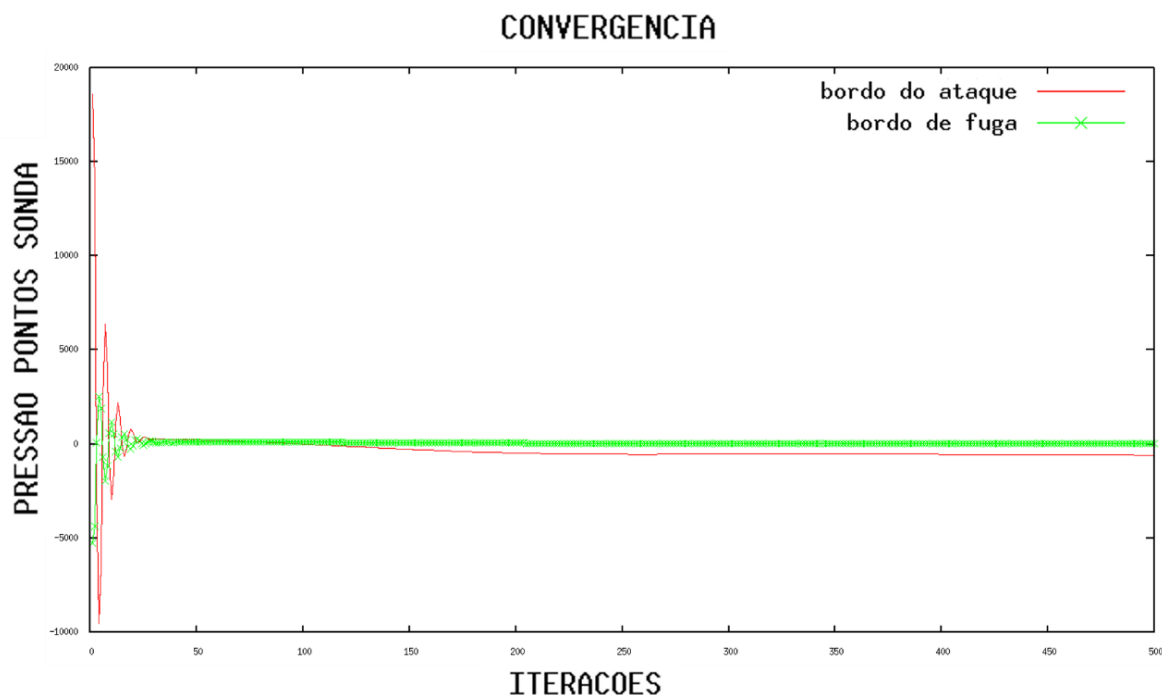


Figura 11. Convergência de pressão por iteração.

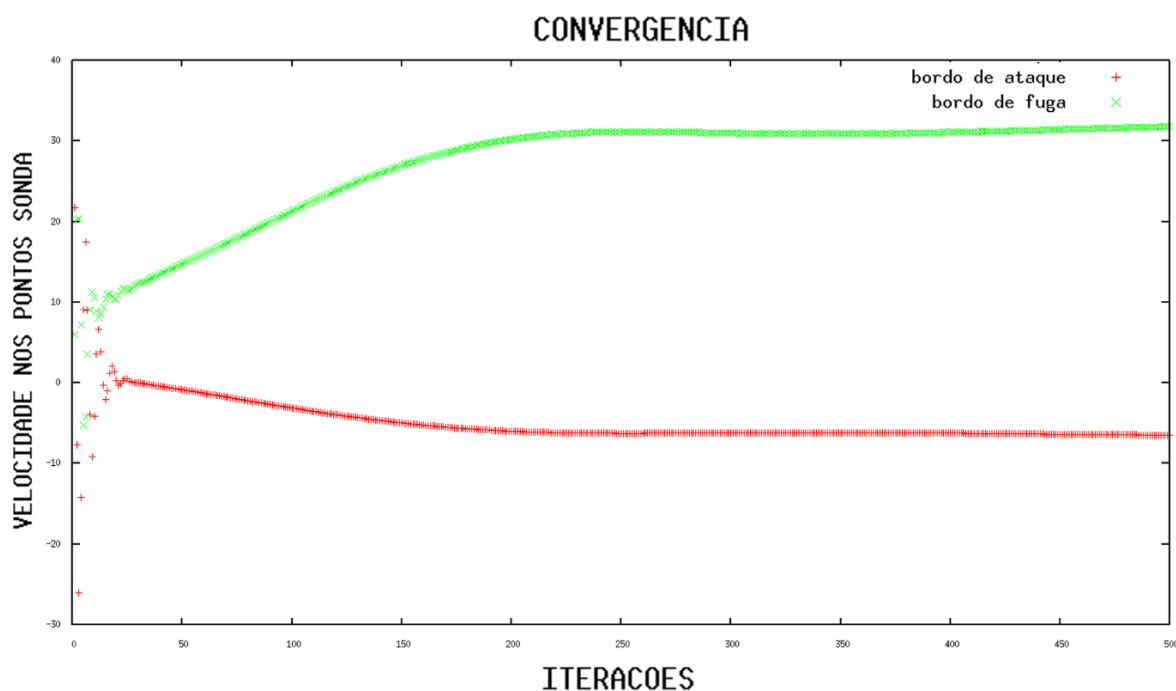


Figura 12. Convergência de Velocidade por Iteração

Os gráficos acima retratam a convergência de pontos, ilustrando bem a turbulência inicial, antes de o regime atingir a característica laminar. A figura 12 merece atenção especial, pois ilustra um fenômeno físico bem peculiar durante o escoamento: A transformação de energia. Num escoamento desse tipo, ou seja, em desequilíbrio, há a transformação de energia

cinética do fluido em energia de pressão, e vice-versa, como foi explicado na fundamentação teórica. No bordo de ataque a pressão é maior, então a energia cinética é menor, implicando numa velocidade menor, acontecendo o fenômeno contrário para o bordo de fuga, onde há pressões bem menores e velocidades maiores.

#### **4. CONCLUSÕES**

Com os resultados obtidos, pode-se concluir que os softwares de simulação ajudam muito na visualização e entendimento de fenômenos físicos, bem como seu desenvolvimento com o passar do tempo. Para o manuseio de um software, para este caso, de manipulação em CFD é necessário em conhecimento prévio do caso a ser tratado, ou pelo menos do básico em dinâmica dos fluidos e aerodinâmica, se considerar a comparação com o uso de um software comercial;

Caso o software seja livre, é muito provável que este seja adaptado ao sistema operacional Linux e necessite de programação em código aberto, o que exige também do usuário conhecimentos em linguagem computacional. Dessa forma, pode ainda ser comprovada a importância da multidisciplinaridade ao se deparar com uma ferramenta como foi usada neste trabalho, não só em questão de desenvolvimento de software, mas no próprio manuseio, ressaltando assim a importância da associação entre mecânica dos fluidos e métodos numéricos;

Com relação aos gráficos apresentados, nota-se que houve uma convergência de pontos de forma a construir uma curva, indicando que o modelo matemático e a forma de construção estão coerentes. A validação deste caso deveria ser feita experimentalmente para enriquecer ainda mais o trabalho, porém seria necessário um aporte financeiro considerável no quesito computacional, estrutural e sensorial. Contudo, os resultados se mostraram válidos e satisfatórios, o que é possível afirmar devido ao conhecimento da física envolvida já comprovada através das literaturas básicas.

#### **REFERÊNCIAS**

**BRUNETTI, FRANCO.** *Mecânica dos Fluidos*. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

**FOX, ROBERT W.; PRITCHARD, PHILIP J.; MCDONALD, ALAN T.** *Introduction To Fluid Mechanics*. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

**POTTER, MERLE C.; WIGGERT, DAVID C.** *Mecânica dos Fluidos*. São Paulo: Thomson Pioneira, 2004.