

VALIDAÇÃO DE UM AEROFÓLIO PARA A ASA DE UM AEROMODELO ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA PARA BAIXO NÚMERO DE REYNOLDS

Gabriel Caetano Bauer¹, Elvys Isaías Mercado Curi², Jorge Ricardo Rzatki³, Richard de Medeiros Castro⁴

^{1,2,3,4}Faculdade SATC/Departamento de Engenharia Mecânica/Laboratório da Mobilidade II (LAB.AERO), Faculdade SATC; Criciúma-SC/ gabriel.bauer@outlook.com.br / elvys.curi@satc.edu.br

Resumo: *Um dos principais requisitos em projetos de aeronaves, é o estudo da aerodinâmica. Reduzir o arrasto gerado pela estrutura, dimensionar corretamente a asa e dimensionar a empenagem, são exemplos de estudos aplicados a esta área durante o desenvolvimento de aeronaves. A escolha do perfil da asa está entre as primeiras etapas na criação de um avião e, possui grande influência sobre as características do projeto. O ensaio experimental realizado em laboratório através do túnel de vento é o método mais eficaz para calcular os coeficientes aerodinâmicos do perfil e identificar neste, o comportamento do escoamento do fluido. Uma alternativa para realizar estes cálculos é a simulação fluidodinâmica, reduzindo o custo financeiro e o tempo de desenvolvimento de projeto. Esse trabalho teve por objetivo, desenvolver a criação do volume de controle, geração da malha e modelo de turbulência do fluido, através da simulação pelo software ANSYS CFX®, para o perfil Eppler 387 e validar os resultados da simulação com dados experimentais deste, divulgadas no memorando técnico da NASA. As considerações feitas no decorrer do trabalho mostraram-se válidas, visto que a simulação ficou próxima aos resultados experimentais, sendo assim o método pode ser aplicado a outros perfis de asa, dando uma maior confiabilidade no projeto.*

Palavras-Chave: *Simulação fluidodinâmica, aerofólio, aerodinâmica, SAE Brasil AeroDesign.*

1 INTRODUÇÃO

O advento da ferramenta CFD (*Computational Fluid Dynamics*) permitiu a simulação de escoamento dos fluídos na criação de diversos produtos, aumentando a confiabilidade de projetos que demandam o estudo da aerodinâmica, como o desenvolvimento de aviões, carros e prédios (VERSTEEG e MALALASEKAERA, 2007, p. 1). A simulação fluidodinâmica é também uma alternativa aos elevados custos de ensaios experimentais, entretanto, saber modelar matematicamente estes fenômenos no computador, requer conhecimento e cuidado nos dados extraídos do alvo em estudo. Validar a simulação e comparar com estudos experimentais já realizados é uma alternativa para inibir erros na etapa de simulação de um projeto (ANDERSON, 1995, p. 6). A aplicação desta ferramenta em competições estudantis, como SAE Brasil AeroDesign®, é um dos caminhos para melhorar do produto desenvolvido pela equipe.

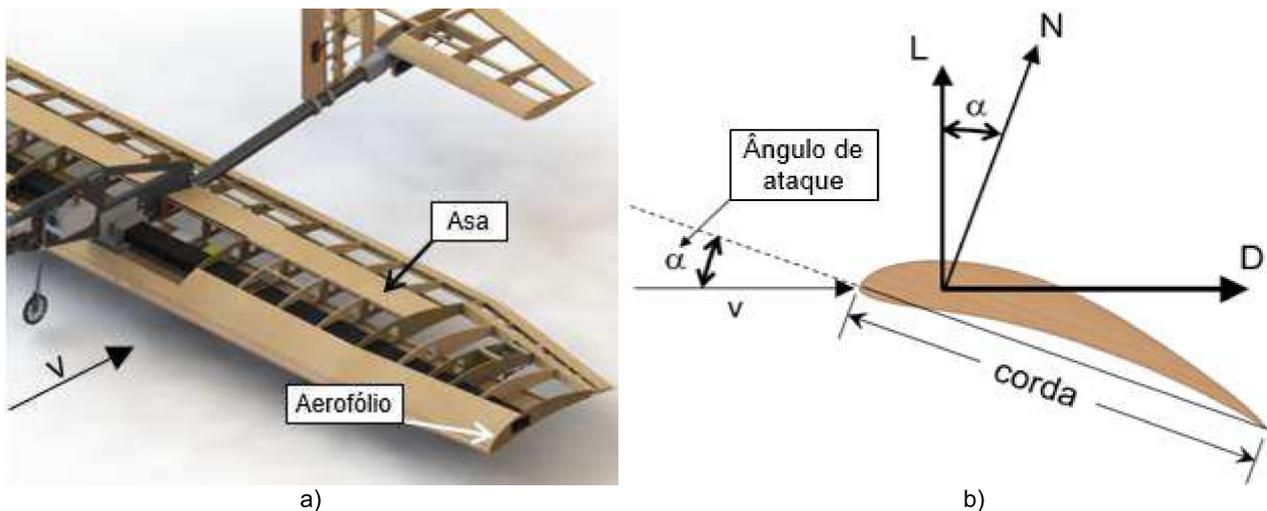
A competição SAE Brasil AeroDesign® ocorre anualmente em São José dos Campos-SP e busca a difusão de técnicas e conhecimento de Engenharia Aeronáutica entre os estudantes de Engenharia (SAE, 2017). Através de um regulamento, os participantes devem aplicar seus conhecimentos para calcular, testar e validar uma aeronave rádio controlada, buscando a maior eficiência estrutural e a capacidade de carregar o maior peso possível. Um dos requisitos para a equipe ter um bom resultado na competição, é realizar a escolha do perfil da asa que possua características aerodinâmicas interessantes ao modelo da competição.

Anderson (2015, p. 294), cita que um perfil de asa possui três coeficientes aerodinâmicos, que são c_l = coeficiente de sustentação, c_d = coeficiente de arrasto e c_m = coeficiente de momento. Os coeficientes podem ser determinados seguindo a Eq. (1), Eq. (2) e Eq. (3).

$$c_l = \frac{L}{2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (1) \quad \text{e} \quad c_d = \frac{D}{2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (2) \quad \text{e} \quad c_m = \frac{M}{2 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot c} \quad (3)$$

Em que L [N] = sustentação, D [N] = arrasto, M [N.m] = momento, ρ [kg/m³] = massa específica do ar, v [m/s] = velocidade de corrente livre, S [m²] = área da asa e c [m] = corda do perfil. A Fig. 01 mostra um exemplo de aeronave e seu perfil aerodinâmico com a direção da velocidade, o ângulo de ataque e das forças de sustentação e arrasto.

Figura 01 – Definições de forças aerodinâmicas, ângulo de ataque e vento relativo em um perfil



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Obter os coeficientes aerodinâmicos é imprescindível em projeto de aeronaves, já que estes coeficientes, aliados a informações geométricas do avião, podem prever a velocidade mínima de voo, capacidade de carga desejada e etc. (DA ROSA, 2006, p. 97).

2 METODOLOGIA

Os coeficientes aerodinâmicos de perfis variam em função do ângulo de ataque, conhecido como α , o número de Mach e o número de Reynolds (ANDERSON, 2015, p. 297). Como a média da velocidade máxima dos aviões na competição SAE Brasil AeroDesign® é próxima a 20 m/s, os perfis foram simulados em regime subsônico e, devido ao número de Mach ser muito baixo, desconsiderou seus efeitos na modelagem. O

número de Reynolds é determinado através da Eq. (4), e a partir deste, pode-se encontrar a velocidade na Eq. (5).

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot c}{\mu} \quad (4) \quad \text{e} \quad v = \frac{\text{Re} \cdot \mu}{\rho \cdot c} \quad (5)$$

Em que Re = Reynolds, μ [Pa.s] = viscosidade ar, ρ [kg/m³] = massa específica do ar, c [m] = corda do perfil e v [m/s] = velocidade de corrente livre.

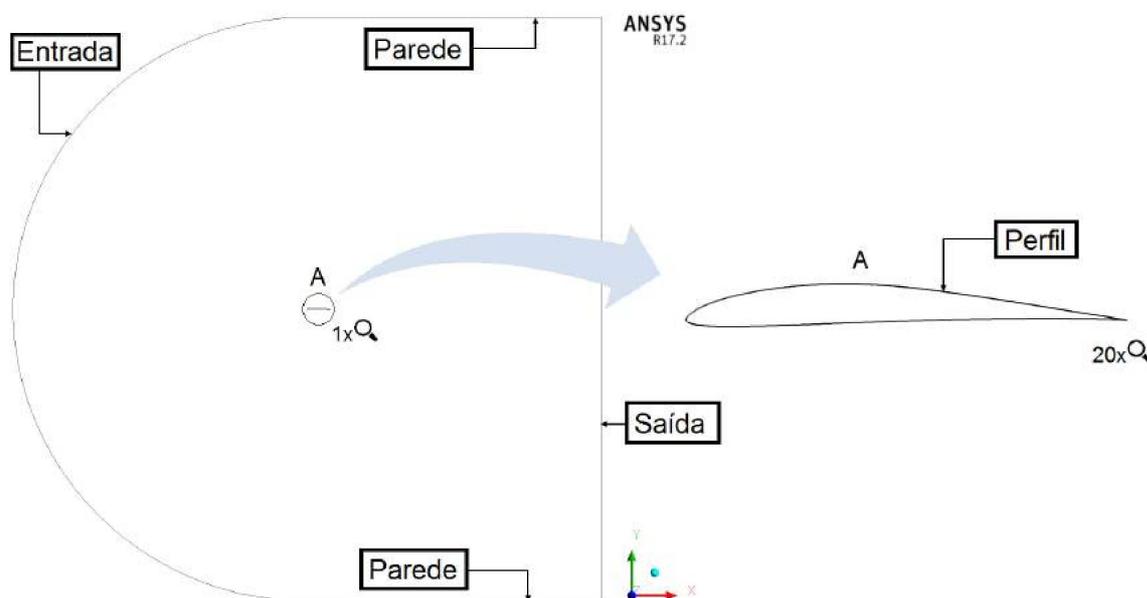
2.1 Procedimentos para Simulação

O perfil Eppler 387 foi selecionado como parâmetro, porque é possível consultar seus dados experimentais num memorando técnico, publicado pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

As coordenadas do perfil E387 foram retiradas da plataforma *online UIUC (University of Illinois at Urbana-Champaign) Applied Aerodynamics Group®*, e então inseridas no *software ANSYS CFX®*. Respeitando as orientações no menu de ajuda do *software ANSYS CFX®*, o volume de controle foi desenhado 12,5 vezes maior que a corda do aerofólio, que foi inserido com a dimensão da corda de 1 m, evitando a influência no escoamento do perfil. O ANSYS CFX® não trabalha com simulações 2D, por isso foi necessário inserir uma espessura pequena de 0,1 m, no volume de controle, uma alternativa comum para obter resultados 2D para quem opta por simular com este *software*.

A representação do volume de controle e perfil E387 é mostrado na Fig. 02.

Figura 02 – Representação do volume de controle do perfil E387



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

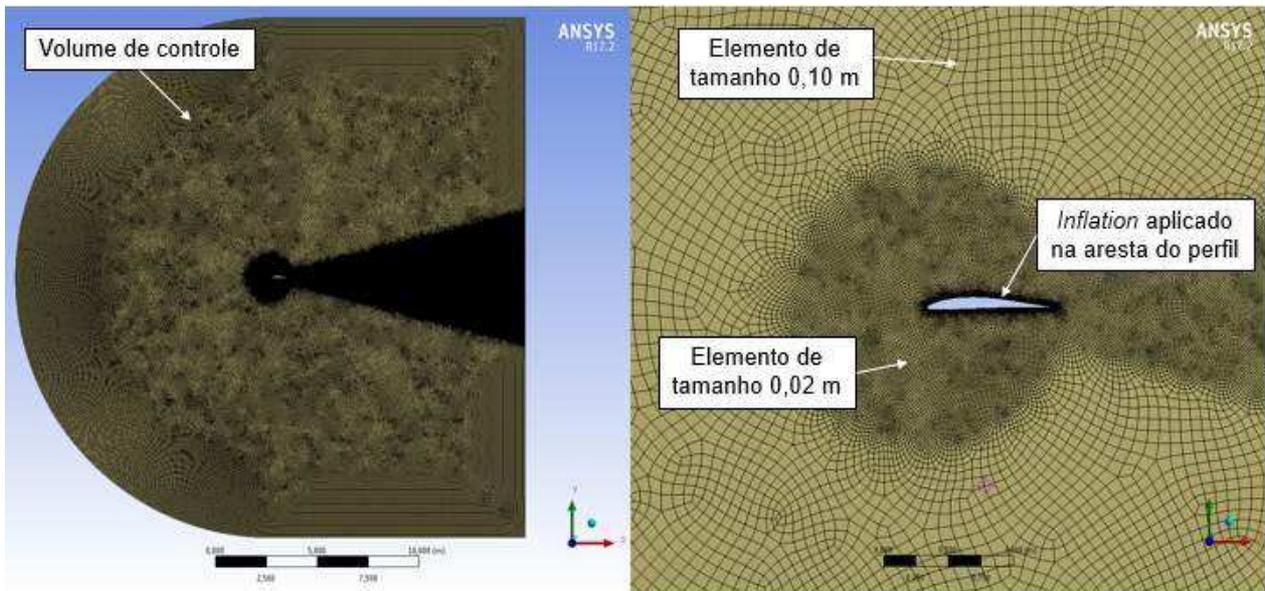
A malha gerada foi do tipo hexaédrica, com o tamanho dos elementos máximos definidos em 0,10 m. Na região próxima ao perfil e na esteira de *downwash*, criou-se uma região para o refino da malha, já que o perfil é o objeto de análise da simulação. Nesta região, definiu-se, elementos com as dimensões máximas de 0,02 m. A ferramenta *inflation* foi aplicada no perfil e, seguindo as recomendações do guia da ANSYS CFX® para definir a espessura da camada próxima ao perfil, utilizou-se a Eq. (4), Eq. (5) e Eq. (6).

$$\Delta y = Le \cdot \Delta y^+ \cdot \sqrt{80} \cdot \sqrt[14]{\frac{Re_x}{Re_{Le}}} \cdot \frac{1}{Re_{Le}} \quad (6)$$

Em que Δy [m] = espessura da camada próxima ao perfil, Le [m] = comprimento total do volume de controle, Δy^+ = distância da parede adimensional, Re_x = número de Reynolds em função da corda do perfil e Re_{Le} = número de Reynolds em função do comprimento total do volume de controle.

Como os dados experimentais do perfil E387 foram ensaiados para $Re = 1E+5$, o valor de Re_x foi definido como $1E+5$. Aplicando a Eq. (5) com a massa específica do ar = $1,225 \text{ kg/m}^3$, viscosidade do ar = $1,812 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s}$ e corda = 1 m, obteve-se uma velocidade do fluido = $1,4792 \text{ m/s}$. Resolvendo a Eq. (4) com a massa específica e com a viscosidade do cálculo anterior, introduzindo a velocidade do fluido determinada com o comprimento total do volume de controle, de 25 m, obteve-se $Re_{Le} = 2,5E+6$. Substituindo as variáveis da Eq. (6) para a distância da parede adimensional = 1, recomendada para este tipo de simulação, o valor da espessura da camada próxima ao perfil é de 0,204 mm. A Fig. 03 apresenta as malhas e o volume de controle na simulação aerodinâmica.

Figura 03 – Representação da malha gerada no volume de controle e tamanhos dos elementos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Em *softwares* que realizam a simulação do escoamento de fluidos, é necessário informar as condições reais de operação. Para isso, foi definido *Symmetry* nas faces nomeadas como simétricas e, *Wall* nas faces nomeadas como perfil. As faces nomeadas como paredes e saída foram configuradas como *Opening*, com pressão relativa de 0 atm e temperatura de referência de 15 °C. Na face chamada de entrada, foi informado como *inlet* e as componentes de velocidade do fluido foram inseridas como U_x , na direção x, U_y na direção y e, no eixo z a velocidade informada foi de considerada nula. As variáveis U_x e U_y são resultados de expressões informadas ao *software* para facilitar na coleta dos dados da simulação.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação foi realizada para ar a 15° C e com escoamento incompressível, já que o número de Mach é abaixo de 0,3. O modo de turbulência escolhido para a simular foi *Shear Stress Transport (SST)*, este modo consegue representar bem o descolamento da camada limite, que é o interesse do estudo.

Foi programado algumas expressões no próprio *software* através de CEL (*CFX Expression Language*), as expressões inseridas foram baseadas nas Equações (1) e (2). Na Fig. 04, apresenta as expressões adicionados ao menu da programação.

Figura 04 – Expressões criadas no *software* ANSYS CFX® com base na linguagem CEL

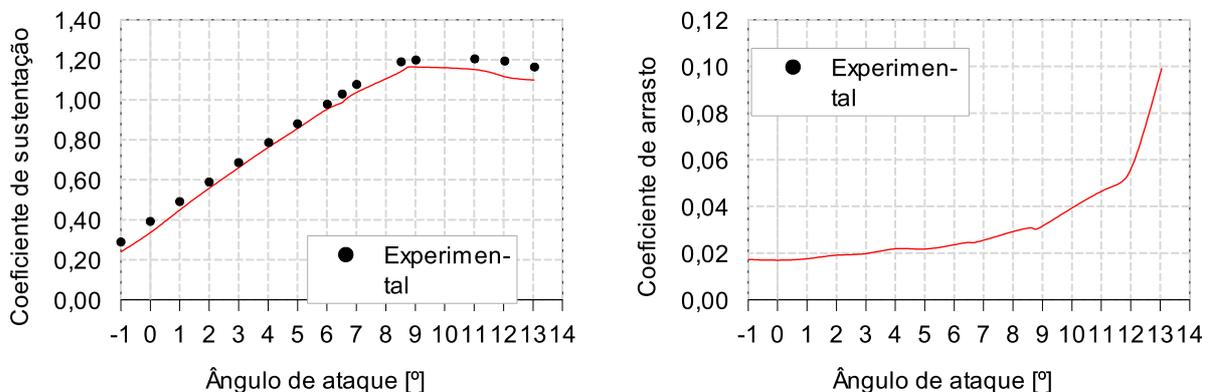
Expressions	
AOA	0 [degree]
CD	$L/(2*\rho*S*(1.4791^2))$
CL	$D/(2*\rho*S*(1.4791^2))$
D	$\sin(AOA)*force_y()@perfil + \cos(AOA)*force_x()@perfil$
L	$\cos(AOA)*force_y()@perfil - \sin(AOA)*force_x()@perfil$
S	0.1 [m^2]
Ux	$\cos(AOA)*1.4791 [m \ ^s-1]$
Uy	$\sin(AOA)*1.4791 [m \ ^s-1]$
c	1 [m]
rho	1.225 [kg m^-3]

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O comando $force_x()@perfil$ e $force_y()@perfil$ indica a força que o perfil está sofrendo na direção x e y respectivamente, em Newtons. O valor de área aplicado foi de 0,1 m², o resultado foi determinado multiplicando a corda de 1 m pela espessura do volume de controle de 0,1 m.

Foi inserido no *software*, os mesmos ângulos de ataques do ensaio experimental para o perfil Eppler 387. A cada ângulo os coeficientes de sustentação e arrasto foram computados. A comparação dos resultados é apresentada na Fig. 04.

Figura 04 – Gráficos comparando os dados experimentais com a simulação realizada



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Na comparação dos valores, o coeficiente de sustentação teve o erro máximo no ângulo de ataque de -1°. O resultado simulado foi de 0,240, enquanto que experimentalmente foi 0,289, resultando em uma diferença de -20,62 %. O erro mínimo registrado foi no ângulo de ataque de 6°, com uma diferença de -2,6 %.

No coeficiente de arrasto o erro máximo encontrado foi no ângulo de ataque de 8,52°, que experimentalmente tem o valor de 0,0246 e, na simulação foi encontrado o valor de 0,03073, obtendo-se uma diferença de +19,95 %. O erro mínimo foi de 2,03 % para o ângulo de ataque de 0°. Ao final, foi aplicado o desvio padrão nas amostras do

coeficiente de sustentação e arrasto. Para o coeficiente de sustentação o resultado foi de 5,13 % e, para o coeficiente de arrasto o valor foi de 5,76 %.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A razão de aplicar desvio padrão aos cálculos foi oriunda da necessidade de aplicar uma medida de dispersão para representar melhor o cenário das amostras encontradas. Apesar dos erros máximos possuírem percentuais altos, que comprometeriam na confiabilidade da simulação, os erros em geral foram mais próximos ao valor do erro mínimo. Como prova, pôde-se observar que o desvio padrão ficou mais aproximado ao valor do erro mínimo, concluindo que os valores dos erros máximos não foram recorrentes.

Visto que foi possível comprovar que a simulação proposta é confiável, o próximo passo seria simular perfis para aplicar a um aeromodelo da competição SAE Brasil AeroDesign®. A plataforma *online UIUC Applied Aerodynamics Group*® dispõe de aproximadamente 1700 modelos de perfis, cada um com diferentes aplicações e objetivos, então deve-se avaliar bem quais condições de voo do avião e qual o objetivo do perfil para reduzir as possibilidades e, portanto, o tempo computacional.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. **Computational Fluid Dynamics**. McGraw-Hill Mechanical Engineering. 1ª edição. 1995.

ANDERSON JR, John D., **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica**. Tradução: Francisco Araujo da Costa. 7. ed. Porto Alegre: Mc Graw Hill Education, 2015.

PORTAL SAE BRASIL, **SAE Brasil AeroDesign**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/sae-brasil-aerodesign>>. Acesso em 14 de julho de 2017.

ROSA, Edison da. **Introdução ao Projeto Aeronáutico: uma contribuição à Competição SAE AeroDesign**. Florianópolis: UFSC, 2006.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W.. **An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Volume Finite Method**. Prentice Hall. 2ª edição. 2007.