

# A APLICAÇÃO DOS SIMULADORES DE EFEITOS AERODINÂMICOS PARA OS CADETES AVIADORES NO ESTUDO DE TEORIA DE VOO

Cad Av Hugo Leonardo Fernandes da Silva<sup>1</sup>  
Ten QOCon André Diniz Rosa da Silva<sup>2</sup>  
Prof Paulo Roberto Ferrari<sup>3</sup>

## RESUMO

O emprego de plataformas de simulação para o desenvolvimento de produtos de engenharia tem sido recorrente para o esclarecimento dos comportamentos de projetos de sistemas complexos, como a produção automobilística, a construção civil ou projeto de aeronaves. Uma plataforma de simulação compreende um complexo computacional que permite a análise dos efeitos gerados pelo material, da mesma forma que permite a inserção em diferentes cenários e padrões, possibilitando a investigação do seu comportamento em situações adversas. O objetivo deste trabalho é determinar a importância do sistema computacional de simulação dos efeitos aerodinâmicos de voo como uma ferramenta que permite uma abordagem mais eficiente e técnica para projetos e permitir maior inserção dos cadetes na compreensão dos conceitos de aerodinâmica estudados nas aulas de teoria de voo. O método utilizado na pesquisa envolve a solução numérica dos efeitos aerodinâmicos, os quais dependem da definição dos aerofólios escolhidos no banco de dados da NACA, no estabelecimento do modelo numérico, na geração da malha, na discretização do modelo matemático e na posterior obtenção e análise dos resultados obtidos do modelo numérico. Desta forma o trabalho pretende esclarecer a importância da plataforma de simulação dos efeitos aerodinâmicos que permite, de forma interativa e inovadora, um estudo mais singular do comportamento do aerofólio e suas respostas aos diferentes padrões de elementos empregados na simulação a qual foi introduzida. Foram observados diferentes aspectos que a plataforma disponibiliza para a análise dos resultados das condições que a asa foi introduzida, para cada cenário de simulação. Esses resultados foram embasados e corroborados através de fundamentação teórica das leis físicas que apontam os efeitos aerodinâmicos, corroborando a relevância do uso de software de simulação para o estudo de teoria de voo.

**Palavras-chave:** Perfis de asa. Comportamento do escoamento. Teoria de Voo. Software de simulação.

---

<sup>1</sup> Curso de Formação de Oficiais Aviadores da Academia da Força Aérea. E-mail: fernandeshugo667@gmail.com

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia e Ciência de Materiais. Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos-USP-Pirassununga, Academia da Força Aérea. E-mail: adinizrs@yahoo.com.br

<sup>3</sup>Mestrado em física na área de concentração em física aplicada. Curso de Aerodinâmica Supersônica- ITA-CTA (1982). Curso de Mecânica de Voo-IPD (PAR)-CTA (1982). Mestre de Física e Teoria de Voo da Academia da Força Aérea. E-mail: ferrariprf@gmail.com

# THE APPLICATION OF AERODYNAMIC EFFECTS SIMULATORS FOR CADET AVIATORS IN THE STUDY OF FLIGHT THEORY

## ***ABSTRACT***

The use of simulation platforms for the development of engineering products has been recurrent to clarify the behavior of complex system designs, such as automotive production, civil construction or aircraft design. A simulation platform comprises a computational complex which allows the analysis of the effects generated by the material, in the same way as it allows the insertion in different scenarios and patterns, enabling the investigation of its behaviour in adverse situations. The aim of this work is to determine the importance of the computational system for simulating the aerodynamic effects of flight as a tool that allows a more efficient and technical approach to projects and allows greater insertion of cadets in the understanding of the concepts of aerodynamics studied in the theory of flight classes. The method used in the research involves the numerical solution of aerodynamic effects, which depend on the definition of the airfoils chosen from the NACA database, the establishment of the numerical model, the generation of the mesh, the discretization of the mathematical model and the subsequent obtaining and analysis of the results obtained from the numerical model. In this way the work aims to clarify the importance of the aerodynamic effects simulation platform which allows, in an interactive and innovative way, a more singular study of the aerofoil behaviour and its responses to the different patterns of elements employed in the simulation to which it was introduced. Different aspects of the platform were observed in order to analyse the results of the conditions under which the wing was introduced, for each simulation scenario. These results were based and corroborated through the theoretical foundation of the physical laws that point to the aerodynamic effects, corroborating the relevance of the use of simulation software for the study of flight theory.

**Keywords:** Wing profiles. Flow behavior. Theory of Flight. Simulation software.

## 1 INTRODUÇÃO

No que diz respeito ao estudo de aerodinâmica e escoamentos de fluidos, Guilherme (2017) ressalta que testes experimentais permitem otimização de projetos para que seus materiais tenham sua resistência aerodinâmica reduzida. Produtos complexos de engenharia como aerofólios de asas produzidos com os mais diversos tipos de perfis aerodinâmicos e turbinas de aeronaves que utilizam, no seu contexto de elaboração, softwares de simulação de escoamento do ar, para examinar diferentes partes do projeto de criação e muitas vezes são usados como elemento de reforço nos estudos de aerodinâmica. (RODRIGUES, A., 2019)

Segundo Guilherme (2017), o simulador de efeitos aerodinâmicos permite realizar, de forma interativa e inovadora, a reprodução da aeronave às condições nas quais ela será imposta e viabiliza a análise dos efeitos do escoamento do fluido sobre o aerofólio, permitindo que exista uma maior interação com o assunto estudado. Este aspecto é útil tanto para a formação do piloto, quanto para os engenheiros, proporcionando maior possibilidade de visualização do projeto e características das asas.

Para os cadetes aviadores, o conteúdo de teoria de voo permite que sejam empregados outros métodos que complementam a aprendizagem, possibilitando a compreensão e domínio do conteúdo abordado para que exista um maior aprofundamento do assunto ministrado pelo docente. Alguns tópicos incluídos na disciplina de Teoria de Voo, especialmente no que diz respeito aos assuntos fundamentados em Aerodinâmica, como o estudo das estabilidades estática e dinâmica, assim como as consequências do escoamento do ar, quer seja considerado incompressível (para pequenos valores do Número de Mach) quer seja considerado como compressível (para Números de Mach próximos ou maiores que a unidade), são conteúdos que poderiam ter compreensão mais aprofundada a partir da utilização do simulador de aerodinâmica, desde que usado paralelamente ao assunto ministrado.

Outro fator importante, quando utilizando o simulador de efeitos aerodinâmicos é a maior interação que a plataforma possibilita, fato que permite um estudo mais aprofundado sobre o comportamento aerodinâmico das asas de aeronaves quando submetidas a diferentes ângulos de ataque, comuns às mais variadas situações reais de voo, assim como permite visualizações virtuais desses voos, porquanto simula esses mesmos voos nas mais diversas condições que o meio pode se apresentar. (RODRIGUES, A., 2019)

Deve-se ressaltar a importância da simulação paralelamente ao conteúdo de Teoria de Voo como fator relevante aos cadetes, permitindo a análise dos diferentes perfis de asas e de seus efeitos aerodinâmicos. Para Souza (2005) o conhecimento das teorias da Física, tal como a importância e aplicação de suas Leis e Princípios são consequências de incentivos do professor, sendo de fundamental importância o aluno buscar uma aproximação com o ambiente tecnológico para auxiliar na compreensão de assuntos mais complexos. Nesse sentido, observou-se que existe a necessidade de utilização de outras plataformas para proporcionar maior adaptabilidade dos alunos para que a compreensão dos temas aplicados ocorresse com uma maior interação com a matéria de Teoria de Voo, de maneira que a assimilação de assuntos complexos se verificasse de forma mais interativa pelo cadete aviador. O software de simulação através do processamento de dados funciona como um mecanismo simples para simulação de diferentes fluxos de escoamento dos fluidos sobre o aerofólio e permite a análise a partir de diferentes possibilidades. Kessler (2016) explica a plataforma CFD (Computational Fluid Dynamics) como um exemplo evidente de plataforma de simulação do escoamento de fluidos, permitindo que sejam pontuados, entre outros aspectos, o estudo das velocidades da aeronave em diferentes condições.

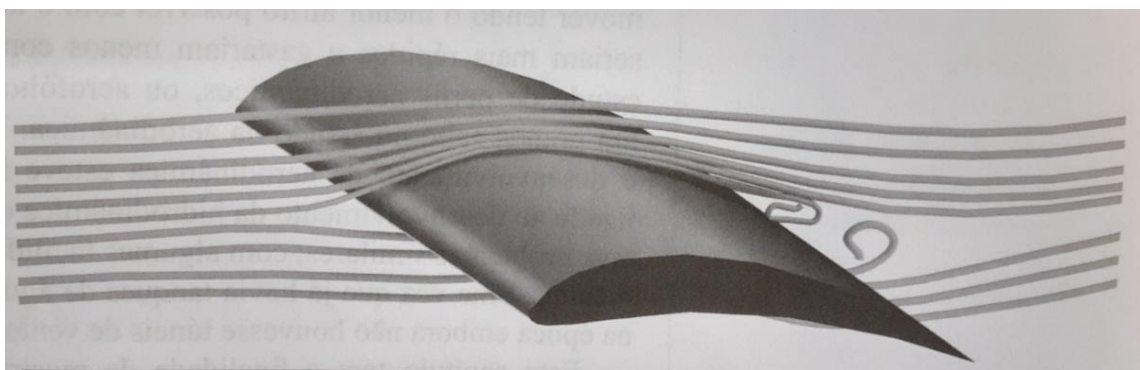
A pesquisa busca salientar a contribuição e possibilidades que a simulação permite, gerando uma maior integração dos estudantes com o conteúdo de aerodinâmica, facilitando a compreensão desse assunto. Foram observados diferentes aspectos que as diversas plataformas de simulação disponibilizam para análise dos resultados das condições que a aeronave pode ser introduzida para

cada cenário de simulação, tal como analisado os diferentes perfis de asas e suas características aerodinâmicas.

## 2 A FÍSICA ENVOLVENDO A FORÇA DE SUSTENTAÇÃO

Entre os aspectos aerodinâmicos que poderiam ter seus fundamentos comprovados a partir da abordagem de simulação, existe o comportamento da sustentação do aerofólio quando inserido em um determinado fluxo. Para José Rodrigues (2013), a força de sustentação da aeronave é o principal componente que permite que seu peso seja equilibrado e permite que o voo ocorra. Os principais aspectos que se aplicam nessa relação, são embasados pela Terceira Lei de Newton e/ou princípio de Bernoulli. José Rodrigues (2013) esclarece o entendimento de que quando uma asa de uma aeronave desloca-se através do ar (que é o fluido em relação ao qual a aeronave se desloca), as componentes decorrentes do escoamento desse fluido são naturalmente orientadas para a parte superior da asa (extradorso) e inferior da asa (intradorso).

**Figura 1** – Escoamento do fluido sobre aerofólio



Fonte: José Rodrigues (2013)

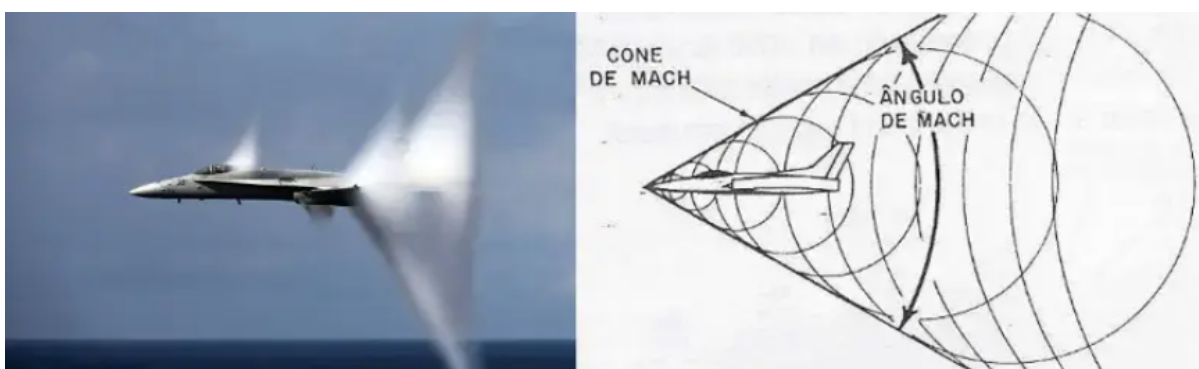
Segundo José Rodrigues (2013) “o ângulo pelo qual o escoamento é defletido por uma superfície geradora de sustentação é chamado de ângulo de ataque

induzido *downwash angle*.” Essa consideração pode ser abordada através de simulações de múltiplos ângulos de escoamento para análise do aerofólio estudado.

## 2.1 O COMPORTAMENTO DE ASAS DELTA NO VOO DE ALTA VELOCIDADE

Uma característica importante nos voos supersônicos é a presença do cone de mach, que ocorre quando uma aeronave voa a uma velocidade superior à do som e gera um cone (perturbação) na forma de um “V”, visualizando no campo bidimensional, conhecido como cone de mach. Esse cone é o principal fator que permite que os controles de voo sejam instalados de forma mais eficiente, tal como a velocidade de estol da aeronave seja maior, quando comparados aos demais perfis de asas. (GÖRTZ,2005)

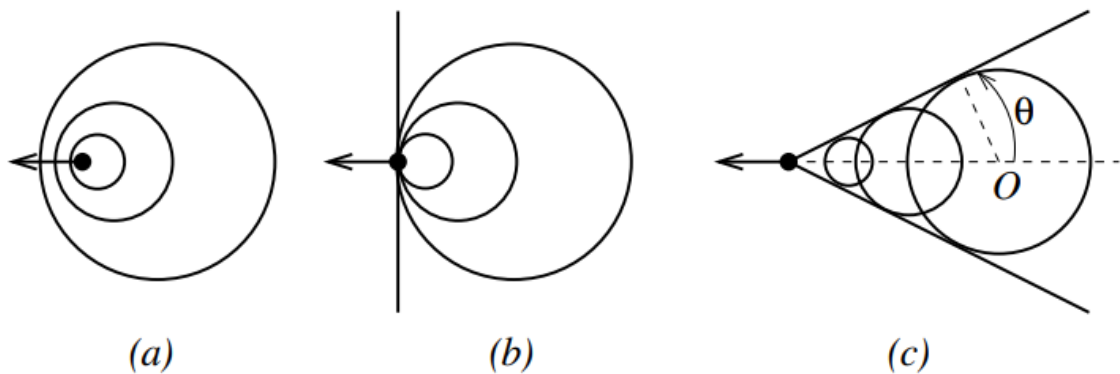
**Figura 2** – Formação do Cone de Mach em Asas Delta



Fonte: Viana (2015)

Ao explorar o comportamento desse tipo de aerofólio, analisando o escoamento no campo bidimensional presente na Figura 3, permanente e compressível, são observadas três características presentes:

**Figura 3** – Formação de ondas de Pressão



Fonte: Miranda (2017)

a) Ao deslocar-se com velocidade subsônica, emite perturbações de baixa escala que se propaga com velocidade maior que a velocidade do avião. Situação na qual o avião se desloca com velocidade menor que a velocidade do som.  $M < 1$ ;

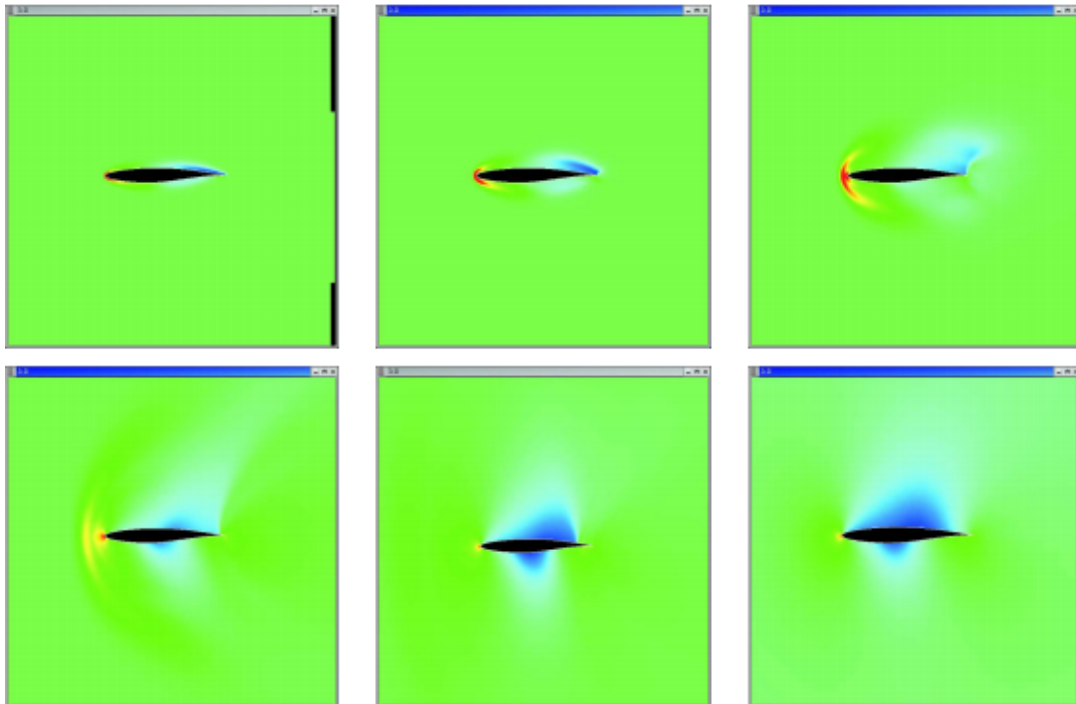
b) O avião desloca-se com a mesma velocidade do som, as derivadas da velocidade são descontínuas. A região anterior ao deslocamento da aeronave encontra-se na zona de silêncio e não recebe sinais de perturbações geradas pelo avião. Para essa situação a equação potencial do escoamento é parabólica.  $M = 1$ ;

c) Situação na qual o avião desloca-se com velocidade superior que a velocidade do som. O campo gerado é originado por derivadas descontínuas. Pontos à frente encontram-se na zona de silêncio. A equação gerada para esse deslocamento é hiperbólica. Existe uma pequena perturbação localizada no ponto O a qual delimita o Cone de Mach e avança perpendicular à mesma. Nessa situação o avião sempre se desloca sobre o vértice do cone.  $M > 1$ .

Ao analisar esse aspecto utilizando algumas plataformas de simulação para compreender o comportamento do fluxo de ar sobre asas de perfil delta, atrelado à teoria estudada, Görtz (2015) ressalta as possibilidades de visualização que a plataforma CFD permite. Quando um aerofólio é analisado usando uma plataforma de simulação, pode-se observar a formação de ondas de choque geradas de forma

progressiva, à medida que a velocidade aumenta para números de Mach mais elevados, em zonas transientes entre fluxos supersônicos para subsônicos. Esse efeito é produto de variações significativas dos efeitos de densidade e pressão sobre o perfil das asas em formato delta.

**Figura 4** – Análise do comportamento das asas no formato delta com o pv3 client



Fonte: Görtz (2015)

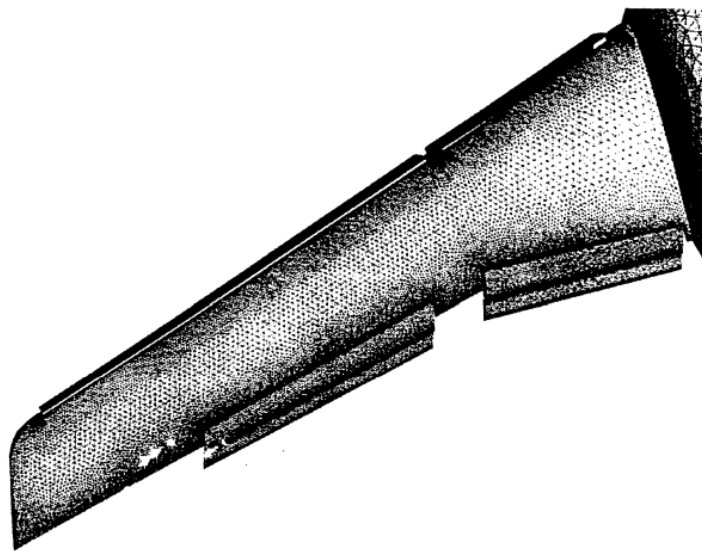
## 2.2 MACH CRÍTICO E ENFLECHAMENTO

Ao discorrer sobre os efeitos do enflechamento do aerofólio, Raymer (1992) ressalta que algumas características como autonomia, manobrabilidade, velocidade de estol e limite estrutural são diferentes de aviões convencionais e existem com a finalidade de fornecer desempenho particular, possibilitando vantagem tecnológica e estratégica, quando se tratando das aeronaves militares.

No que diz respeito às asas enflechadas, existem dois tipos de enflechamentos: o positivo e o negativo, definido pelo ângulo gerado entre o bordo de ataque e à linha perpendicular à fuselagem do avião. As asas que possuem

enflechamento positivo apresentam contribuição positiva para retardo do Mach crítico gerado nas altas velocidades. Mach crítico está presente em zona transiente entre regimes de voo supersônico e subsônico, na qual a velocidade do fluido atinge Mach 1.

**Figura 5** – Análise do Perfil de asa com enflechamento positivo



Fonte: Marcum (2001)

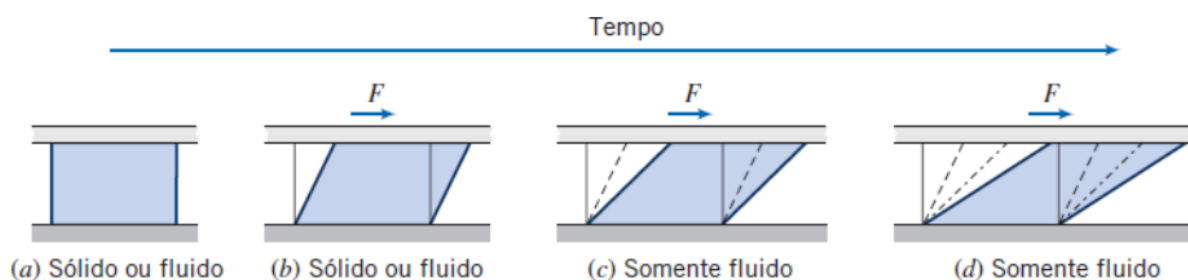
Outro fator relevante no que diz respeito as asas com enflechamento positivo, observado na Fig.5, é o comportamento do fluido que ao entrar em contato com o aerofólio, sua intensidade é decomposta em dois vetores, um paralelo e outro perpendicular ao bordo de ataque. Nesse sentido, o efeito do fluxo sobre as asas sempre é inferior ao efeito do fluxo sobre o avião, haja vista que, nas asas enflechadas, a intensidade é proporcional ao cosseno do ângulo de enflechamento. Esse aspecto é determinante quando se trata da distribuição de pressão sobre o aerofólio, ou seja, o fato de possuir um enflechamento positivo, permite que a aeronave aumente seu Mach crítico e possibilita que a aeronave possa voar em velocidades cada vez maiores sem que sofra os efeitos gerados pela alta velocidade, tal fato permite que as aeronaves que possuem asas com enflechamento positivo apresentem contribuição para o voo em altas velocidades,

fator preferencial para projetistas de aeronaves, haja vista a importância do voo em alta velocidade para o transporte de pessoal. (RODRIGUES, J., 2013)

### 3 CONCEITOS FUNDAMENTAIS ENVOLVENDO OS FLUIDOS

Ao discorrer sobre fluidos Fox, Mcdonald e Pritchard (2015) definem um fluido como uma substância capaz de se deformar continuamente à medida que é aplicado uma tensão de cisalhamento de forma tangencial sobre ele, não importando seu grau de aplicação. Como o movimento do fluido progride conforme a tensão é aplicada, outra forma de definição é compreender um fluido como uma substância que não é capaz de sustentar uma tensão de cisalhamento quando em repouso.

**Figura 6** - Comportamento de sólido ou líquido devido ao cisalhamento



Fonte: Fox, Mcdonald e Pritchard (2015)

Os fluidos podem se apresentar de diferentes formas, tal como líquido ou gasoso. Ao observar a Fig. 6 distingui-se o comportamento entre sólido e fluido. Ao inserir uma outra substância entre dois planos ( Fig. 6 *a* ) e for aplicado uma força de cisalhamento  $F$  , sobre a superfície superior, é observado um deslocamento inicial sobre o fluido ( Fig. 6 *b* ); todavia, ao ser analisado o comportamento de um sólido, considerando a força  $F$  menor que a força capaz de levar a substância a seu limite elástico, nota-se que ele ficará em repouso, ao passo que o fluido continuará sua deformação enquanto a força é aplicada. ( Fig. 6 *c* , Fig. 6 *d* ). Deve-se notar que o fluido não desliza sobre a superfície sólida, dada essa condição de não deslizamento, o fluido possui a mesma velocidade da superfície. (FOX, MCDONALD & PRITCHARD, 2015)

### 3.1 FLUIDOS SOBRE UM MEIO CONTÍNUO

O comportamento dos fluidos, segundo Tipler e Mosca (2009), é caracterizado por ser um movimento complexo de ser analisado, sobretudo os escoamentos turbulentos.

Em se tratando dos fluidos, muitas vezes é atribuída a característica de serem “lisos e suaves”, ou seja, como um meio contínuo. Fox, Mcdonald e Pritchard (2015) corroboram que a estrutura molecular do fluido existe de maneira que a massa não está disposta de forma contínua no espaço, mas sim concentrada em moléculas que estão separadas por regiões relativamente grandes de espaço vazio.

O conceito de um fluido contínuo é a base da mecânica dos fluidos clássica. A hipótese do fluido contínuo é válida no tratamento do comportamento dos fluidos sob condições normais. Ela falha, no entanto, somente quando a trajetória média livre das moléculas torna-se da mesma grandeza da menor dimensão característica significativa do problema. (FOX, MCDONALD & PRITCHARD, 2015, p. 43)

Essa falha é considerada para casos específicos, como o escoamento de um gás rarefeito, nesse caso deve-se abandonar o conceito de continuidade.

Segundo Tipler e Mosca (2009), ao considerar o fluxo de um fluido sobre um tubo que contém seção afunilada com área menor na saída, levando em consideração escoamento não turbulento, da esquerda para direita, o tempo que o fluxo percorre a seção reta 1 é  $\Delta t$ . Sabendo que a massa específica e a velocidade do fluido na seção 1 são  $\rho_1$  e  $v_1$ , respectivamente, e a área da seção é  $A_1$ , então a massa  $\Delta m_1$  que passa através da seção 1 será dada por:

$$\Delta m_1 = \rho_1 \Delta V_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t \quad (\text{Equação 1})$$

Sendo que  $\Delta V_1$  é o volume do fluido que percorre sobre a seção reta 1 durante o tempo  $\Delta t$ . Define-se  $I_M$  como a **vazão mássica** do fluido sobre a seção, sendo:

$$I_M = \rho A v \quad (\text{Equação 2})$$

Onde, a dimensão de  $I_M$  é definida pela razão da massa pelo tempo. A massa do fluido  $\Delta m_2$  que passa pela seção reta 2, durante o mesmo tempo  $\Delta t$ , é definido por:

$$\Delta m_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t \quad (\text{Equação 3})$$

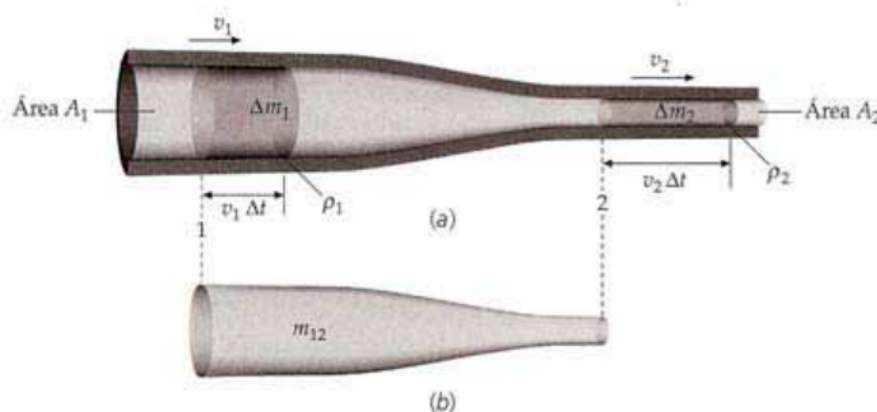
Sendo  $\rho_2, A_2, v_2$ , respectivamente, massa específica, área e velocidade do fluido na seção reta 2. (TIPLER & MOSCA, 2009, p.446)

Se a **vazão mássica** da seção reta 2 é maior que a presente na seção reta 1, tem-se como resultado o aumento da massa entre as seções, sendo em virtude da diferença entre a quantidade da massa que entra na região e a quantidade que se afasta ( variação da massa acumulada). Desta forma, defini-se a **equação da continuidade** por:

$$I_{M1} - I_{M2} = dm_{12}/dt \quad (\text{Equação 4})$$

Sendo  $I_{M1}$  e  $I_{M2}$ , vazões mássicas entre as seções 1 e 2. Nos escoamentos onde o fluido é constante e não varia com o tempo, são chamados de escoamentos estacionários.

**Figura 7** - Esquema de vazão mássica sobre tubo



Fonte: Tipler e Mosca (2009)

### 3.2 CONSERVAÇÃO DO MOMENTO E EQUAÇÃO DE BERNOULLI

No que diz respeito à conservação de momento, Fefferman (2006) afirma que as equações Navier-Stokes são fundamentais para descrever o comportamento dos fluidos, sendo baseadas na aplicação da segunda lei de Newton.

A equação de Bernoulli relaciona pressão, altura e rapidez de um fluido incompressível não-viscoso em escoamento estacionário. Viscosidade é a propriedade que o fluido apresenta para resistir a um escoamento. (TIPLER & MOSCA, 2009)

Durante o escoamento de um fluxo estacionário, o fluido se move ao longo de linhas de corrente, que são retas ou suaves e não se cruzam.

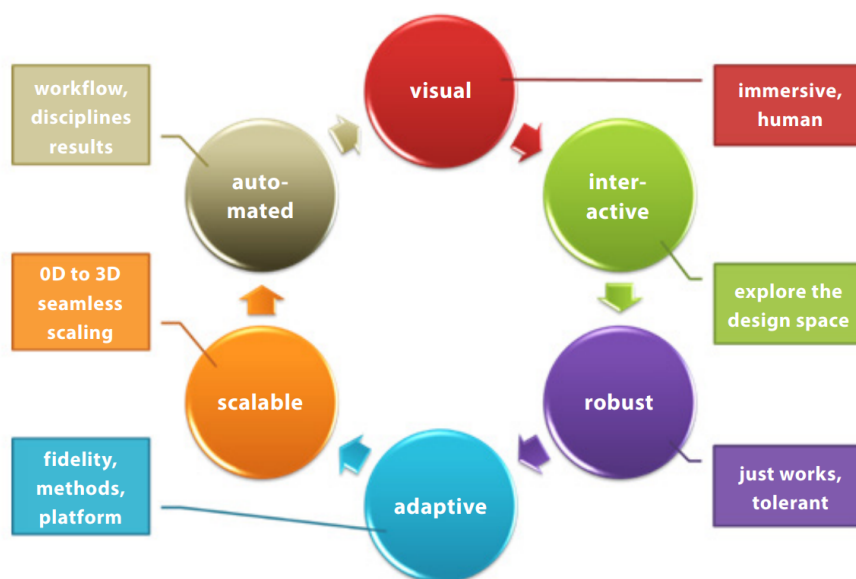
## 4 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A Dinâmica dos Fluidos Computacional, abreviado no inglês como CFD, teve sua origem na década de 1950. Segundo Camargo (2017) a plataforma tornou-se um acréscimo à aplicação dos túneis de vento para análise dos projetos envolvendo o desenvolvimentos de aerofólios. Segundo Camilo (2003), a plataforma se caracteriza como uma oportunidade de simular condições que nem sempre são possíveis de serem aplicadas em laboratórios. Em termos de visualizações que essas plataformas permitem, existe a possibilidade de analisar campos e fluxos sobre diferentes aerofólios e veículos cada vez mais complexos, em termos de engenharia. Todavia, ainda há uma diferença significativa entre realidade e a complexidade envolvida nas simulações. (MARCUM, 2001)

Em termos comparativos Fortuna (2000) ressalta a importância dos métodos analíticos em detrimento aos experimentais, elencando pontos positivos como: a presença de soluções contínuas sobre o domínio, baixos custos de implementação, geometrias e condições de contorno simples e geralmente está restrita a problemas lineares. A partir disso a Dinâmica dos Fluidos Computacional pode ser definida como:

Área da computação científica que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento com ou sem trocas de calor. (FORTUNA, 2000, p. 21)

**Figura 8** - Diagrama dos “círculo de fatores” abordados no CFD



*Factors impacting the design of an "Ideal" CFD code*

Fonte: Hanna e Weinhold (2017)

A Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) utiliza alguns métodos numéricos para resolver problemas simples envolvendo a mecânica dos fluidos. Segundo Hanna e Weinhold (2017), o maior desafio para os engenheiros do futuro está atrelado à complexidade do produto e seu comportamento quando interagindo com o meio o qual será inserido. Dessa forma Hanna e Weinhold (2017) ressaltam a importância do círculo de fatores, Fig. 8, que deve ser satisfeito no processo de simulação. Os simuladores atuais utilizam planilha eletrônica, na qual é levado em consideração as soluções de forma mais simples de uma equação diferencial, sendo uma equação diferencial ordinária de primeira ordem. (FOX, MCDONALD & PRITCHARD, 2015)

Segundo Baker (2008) a Dinâmica de Fluidos Computacional é a ciência que estuda e prevê o comportamento do fluido, transferência de calor, transferência de massa e reações químicas através de equações matemáticas que os governam utilizando o processo numérico. (MALISKA, 2004)

#### 4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Fortuna (2000) ressalta que os escoamentos dos fluidos que envolvem um corpo extenso variam de laminar até turbulentos. Roma (2006) aponta que a geometria do corpo imerso nesse escoamento e sua velocidade de escoamento do fluido sobre a superfície do corpo, são cruciais para a definição do tipo de escoamento.

#### 4.2 DISCRETIZAÇÃO DA ÁREA DE INTERESSE E GERAÇÃO DA MALHA

Fortuna (2000) afirma que os termos que envolvem as equações do modelo matemático são aproximados através de métodos numéricos que permitem gerar um sistema de equações algébricas discretizadas do tipo:

$$[A][X]=[b] \quad (\text{Equação 5})$$

A partir disso é possível utilizar um método “solver” direto capaz de resolver essa equação:

$$[X]=[A]^{-1}[b] \quad (\text{Equação 6})$$

No que diz respeito a geração de Malha ou Grid, compreende-se como:

As malhas são a forma com a qual o computador é capaz de solucionar as equações aos limites do corpo. Elas projetam a geometria do mesmo no domínio o qual contém o fluido e através de nós (pontos que interligam as arestas) permitem ao computador calcular as resultantes de cada elemento finito. (CAMARGO, 2017, p. 19)

Para Bakker (2008) o domínio é discretizado em partes finitas de volumes ou células. O domínio discretizado é denominado de grid ou malha, onde a conservação geral envolvendo equações de conservação de massa, momento e energia são discretizados em equações algébricas.

## 5 MATERIAL E MÉTODO

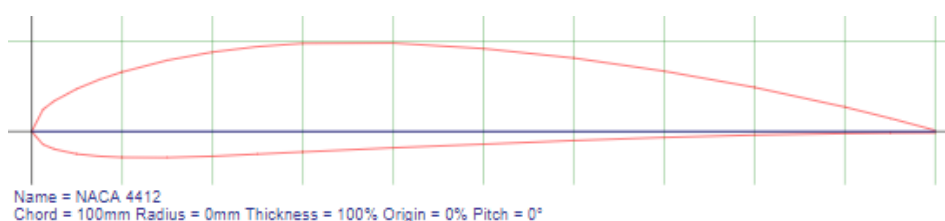
Para se obter a análise do escoamento do fluido sobre o perfil de aerofólio, e entender suas propriedades de arrasto, sustentação e demais aspectos aerodinâmicos, fez-se necessário o domínio da Mecânica dos Fluidos e da compreensão da Dinâmica dos Fluidos Computacional como forma de emprego para análise dos resultados. Foi empregado os dados geométricos das coordenadas envolvendo o aerofólio NACA 4412 como exemplo de aerofólio que poderia ser analisado com a plataforma ANSYS, atrelado aos conhecimentos de Teoria de Voo.

Foi utilizada a versão ANSYS WORKBENCH 19.2 como software de simulação para emprego atrelado aos conteúdos de teoria de voo. Para estudos das etapas de simulação e abordagem dos conceitos aerodinâmicos envolvidos, foi utilizado dados do perfil NACA 4412 adquirido no banco de dados do Departamento de Engenharia Aeroespacial de Illinois (Department of Aerospace Engineering of University of Illinois).

### 5.1 APLICAÇÃO DA PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO PARA O ESTUDO DE TEORIA DE VOO UTILIZANDO O PERFIL NACA 4412

A utilização da Plataforma Ansys, dispondo do banco de dados de aerofólios NACA, pode ser facilmente observada como boa técnica de aprendizagem e aplicações de recursos extraclasses, no que diz respeito ao estudo de Teoria de Voo. Foi analisado o perfil do aerofólio NACA 4412, Fig. 9, e aplicado a esse perfil diferentes tipos de escoamentos, bem como analisado a resposta desse perfil aos diferentes fluxos ao qual foi inserido.

**Figura 9** - Esquema do Perfil NACA 4412



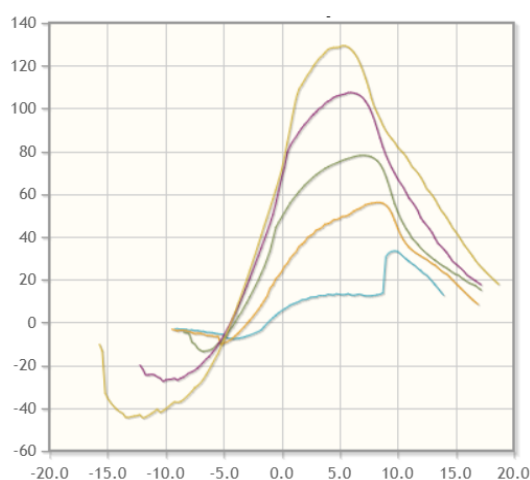
Fonte: Airfoil Tools Database

Em termos de análise de perfis de asa, houve a utilização do Perfil NACA 4412 e da Plataforma de Simulação ANSYS WORKBENCH que possui diversos plugins para análise do comportamento do fluxo sobre os diversos produtos de engenharia.

O software da Dinâmica dos Fluidos Computacional acelera o desenvolvimento de produtos complexos e permite a análise dos resultados obtidos no campo tridimensional. Segundo Bakker (2008), ao ser abordado o conceito de Dinâmica dos Fluidos, deve ser compreendido através de três vertentes: o processo experimental de análise, o processo teórico e por fim o processo numérico, que é o processo que envolve a utilização da plataforma de simulação. As ferramentas de simulação ANSYS são fundamentais para examinar todos os desafios da velocidade hipersônica, haja vista os diferentes comportamentos que os fluidos começam produzir quando submetidos a valores de Mach maior que 1. As simulações multifísicas permitem que os usuários capturem fenômenos complexos que ocorrem, incluindo choques fortes, plasma, ablação, deformação estrutural e desequilíbrio químico. (ANSYS 2021)

## 5.2 CURVAS DE DESEMPENHO DO MODELO NACA 4412

**Figura 10** - Curvas  $C_L/C_D \times \alpha$  NACA 4412



Fonte: Airfoil Tools Database

Aviões com propulsão a hélice possuem a característica de apresentar sua curva de desempenho, Fig.10, expresso através de diagramas envolvendo a potência necessária, potência disponível e a velocidade na qual o aerofólio é submetido, levando em consideração os diferentes valores de peso, altitude e configuração.

### 5.3 INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS ATRAVÉS DA DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A análise começa através do modelo matemático do problema físico que será envolvido. A conservação da matéria, momento e energia devem ser respeitadas na região de interesse que será analisada, além disso as propriedades do fluido são modeladas empiricamente e alguns aspectos que envolvem o problema são definidos, como a natureza do curso (fluxo estável ou não), se é considerado incompressível, invíscido, entre outros aspectos.

Por meio desses fatores é aplicado o método numérico (chamado de discretização) para desenvolver aproximações das equações que governam a mecânica dos fluidos sobre a região de interesse que será estudada (aerofólio). A partir disso ocorre o processo algébrico, geração de malha ou grid da região de interesse, solução numérica que são resolvidas através de um sistema de equações solve. (BAKKER 2008)

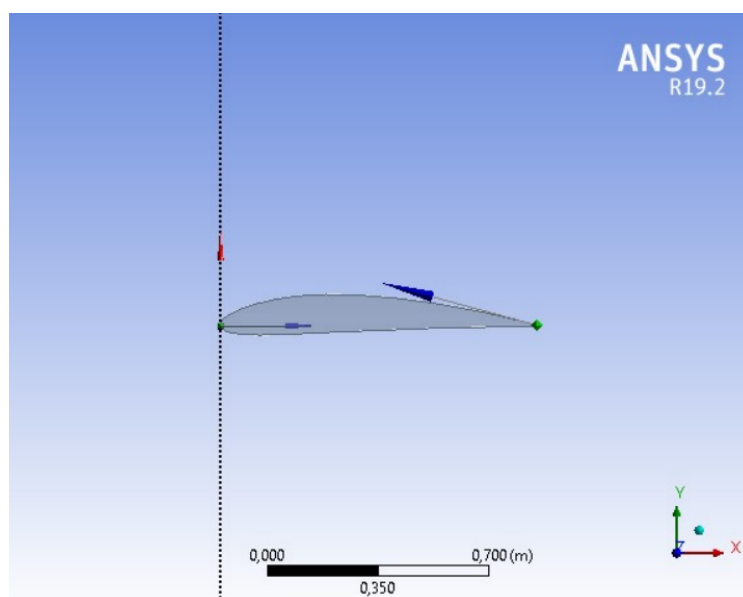
### 5.4 ETAPAS DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 5.4.1 **Obtenção das coordenadas do perfil e geração do perfil**

A primeira etapa no estudo de um determinado aerofólio que foi feito na plataforma ANSYS WORKBENCH 19.2 foi a geração da geometria do perfil de asa, Fig. 11, que pode ser adquirida através do banco de dados de aerofólios da NACA. Foi usado como exemplo o perfil NACA 4412 para estudo atrelado à simulação

desse perfil de asa. Além da plataforma de simulação ANSYS foi utilizado o software Microsoft Excel que permitiu organizar as coordenadas da geometria da asa para posterior utilização das coordenadas no simulador e posterior geração da malha do perfil NACA 4412, permitindo o ajuste das dimensões do perfil.

**Figura 11** - Perfil NACA 4412

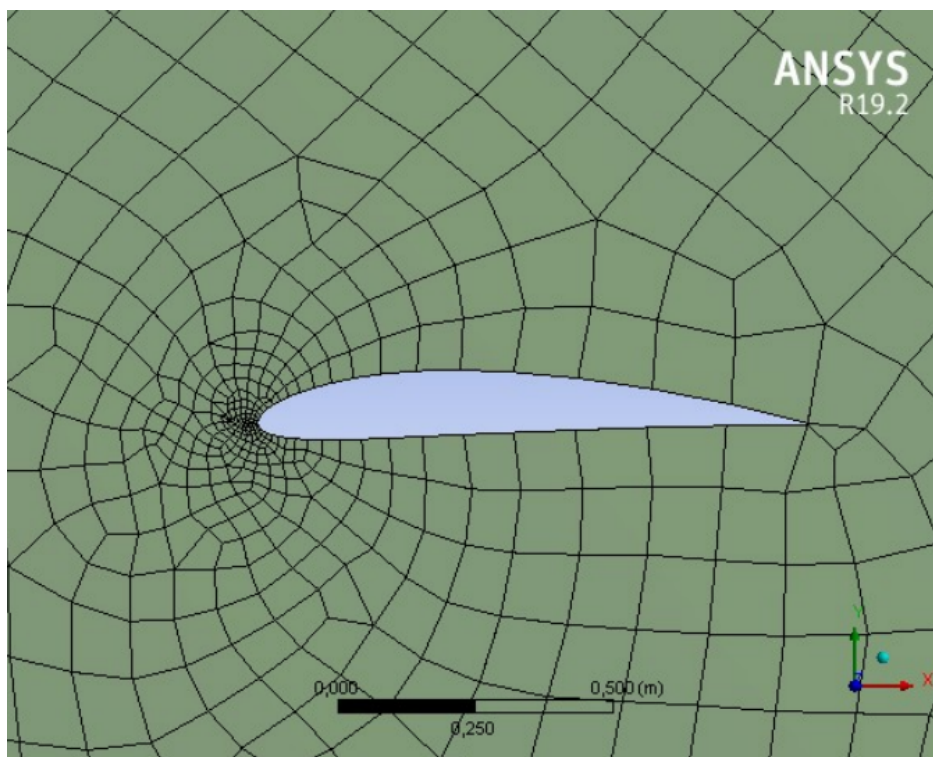


Fonte: O autor (2021)

#### 5.4.2 Geração do Grid de contorno do perfil

A geração da malha de contorno do perfil NACA 4412 foi feita através da plataforma ANSYS, sendo inserido 0,15 m de tamanho de cada elemento. Cada célula foi gerada pela discretização da área de interesse ao redor do perfil, permitindo que fosse analisada cada parte através das leis que governam a Dinâmica dos Fluidos Computacional. Ao observar a Fig. 12 é possível verificar a geração da malha de contorno da área de interesse em torno do aerofólio que será analisado, permitindo a sua divisão em partes finitas, permitindo a discretização das equações de conservação em equações algébricas abordadas em teoria de voo.

**Figura 12** - Geração da malha de contorno do perfil NACA 4412

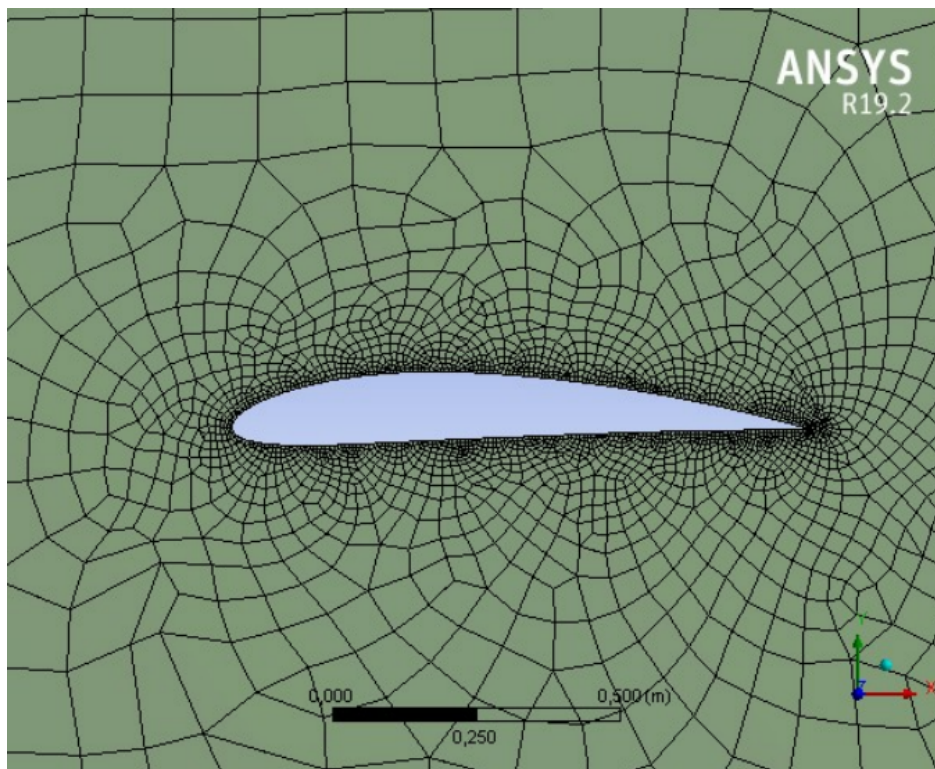


Fonte: O autor (2021)

Em seguida foi realizado um aumento da quantidade de malhas na área de contorno da asa, para que fosse possível analisar com precisão a superfície de contorno do aerofólio. Dessa forma, foi incrementado o número de 400 malhas inseridas na área de interesse, gerando partes cada vez menores próximas ao aerofólio.

O processo de redução do tamanho de cada malha teve como objetivo o refinamento da área de contorno do perfil, o qual foi gerado como fenda sobre a área de interesse, buscando uma redução das malhas em partes cada vez menores com a finalidade de dividir a região de interesse em pequenos múltiplos volumes de controles para serem resolvidos a partir de soluções algébricas pela plataforma de simulação para posterior análise dos resultados.

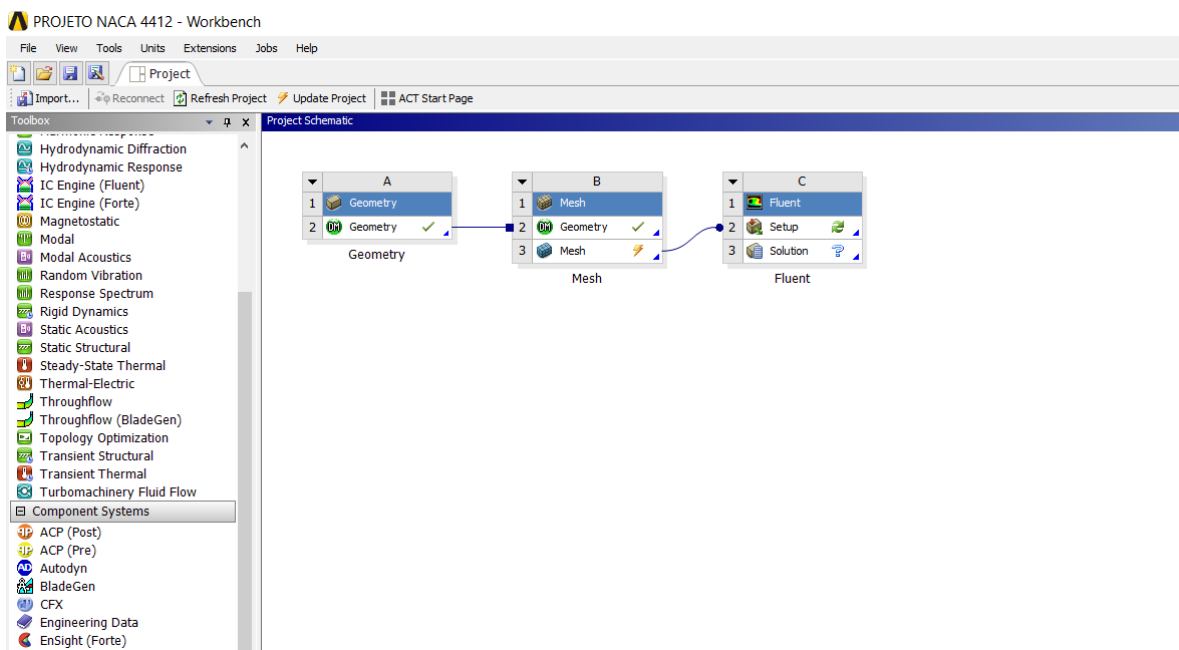
**Figura 13** - Incremento do Grid na superfície de contorno



Fonte: O autor (2021)

Em seguida, após a geração da geometria e posterior discretização da malha do volume de interesse, foi utilizado o plugin de análise de fluxo ANSYS FLUENT, Fig. 14, para obtenção dos resultados e inserção dos parâmetros físicos que envolvem a área de contorno. Foi definido o ar como matéria do fluido da massa de interesse sobre o aerofólio, e definido a velocidade de entrada do volume em questão de  $12\text{ m/s}$ .

**Figura 14** - Etapas da geração e estudo do aerofólio



Fonte: O autor (2021)

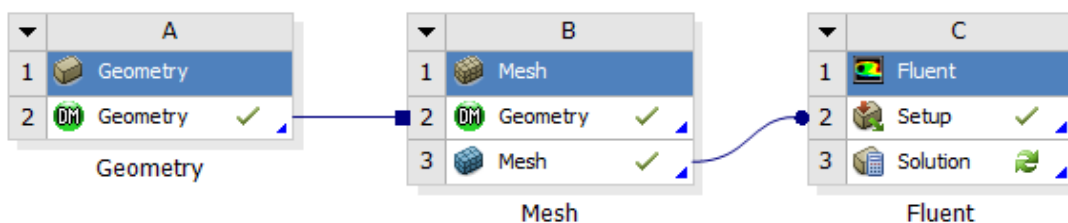
### 5.4.3 Aplicação da malha do volume de interesse no ANSYS FLUENT

Após a definição das propriedades envolvendo a simulação do perfil, escolhendo o ar como meio de simulação, estabelecendo a velocidade do fluido na entrada da área de interesse, foi possível, usando o software ANSYS FLUENT, visualizar a geração das linhas de contorno da velocidade ao redor do perfil, Fig. 16, observando-se um comportamento já esperado de aumento da velocidade do fluxo no extradorso da asa, quando comparado ao intradorso, fato fundamentado nos conteúdos da disciplina de teoria de voo. Outra possibilidade gerada foi a visualização das linhas de pressão sobre a fenda em perfil de aerofólio, tal como a observação do contorno de turbulência ao redor da área de interesse.

Outro fator relevante no processo de simulação envolvendo a plataforma ANSYS FLUENT, foi a geração gráfica dos coeficientes de sustentação e arrasto para cada interação gerada pela plataforma, permitindo uma análise dos resultados gerados pelo próprio simulador. É evidente a possibilidade de visualização do perfil

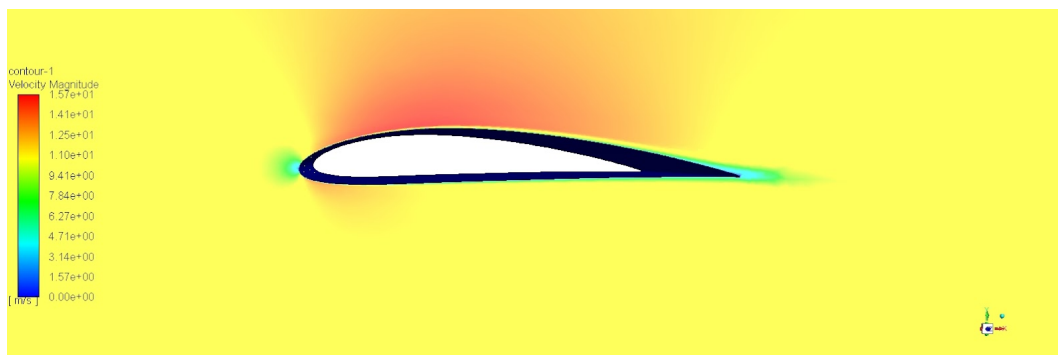
no estudo de diferentes aspectos específicos quando inseridos nas etapas de simulação.

**Figura 15** - Etapas do processo de simulação



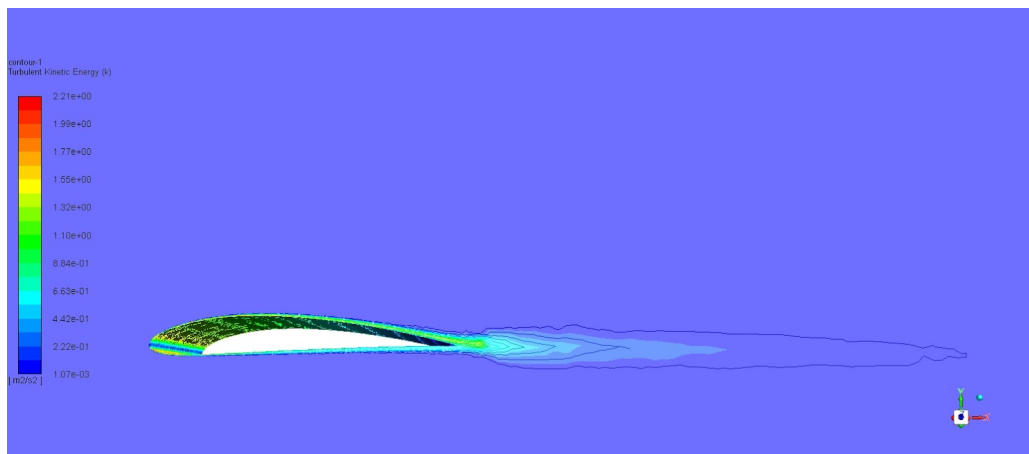
Fonte: O autor (2021)

**Figura 16** - Velocidade de contorno do perfil NACA 4412



Fonte: O autor (2021)

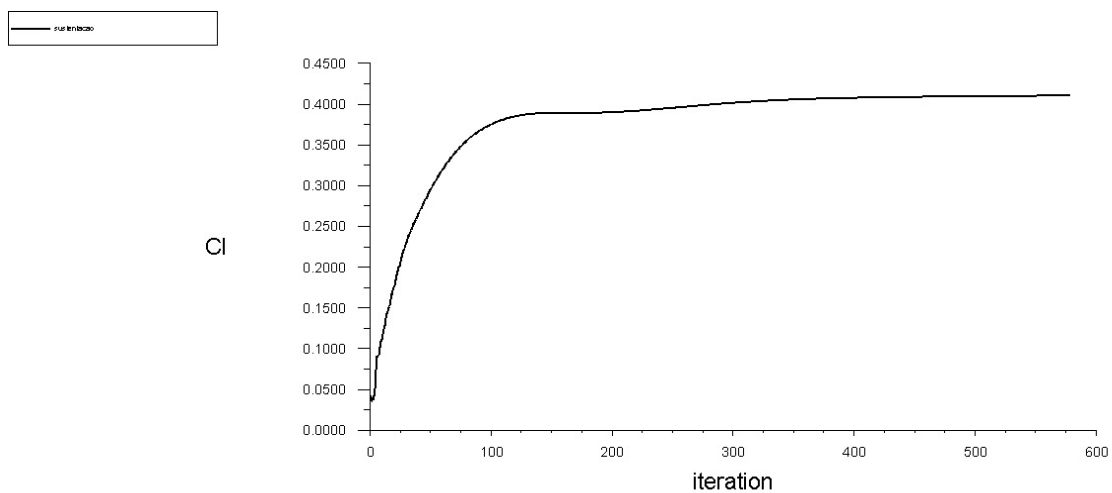
A partir da geração do contorno de turbulência ao redor do perfil é possível visualizar o comportamento do fluxo ao entrar em contato com o corpo gerado, tal fato permite atrelar o comportamento do fluido aos diferentes tipos de ângulos de ataque, permitindo um estudo do comportamento da camada limite do aerofólio, possibilitando a definição da velocidade de estol do perfil.

**Figura 17** - Contorno de turbulência do perfil NACA 4412

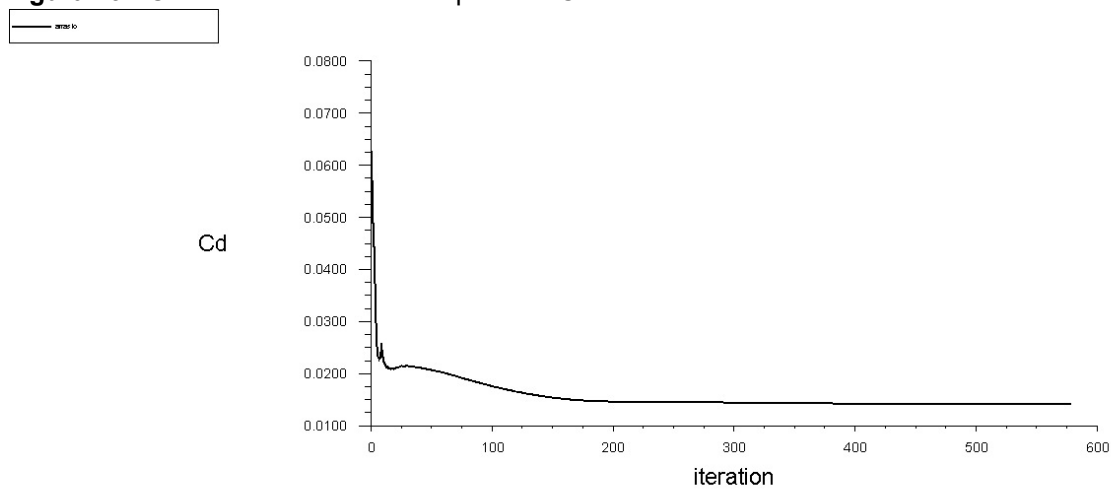
Fonte: O autor (2021)

Dessa forma foi possível verificar o comportamento desse perfil no quesito velocidade e turbulência de contorno do aerofólio, Fig. 17, permitindo um estudo mais interativo desse perfil com a disciplina de Teoria de voo. Entende-se que outros perfis poderiam ser analisados com a plataforma ANSYS WORKBENCH, permitindo a utilização do software e reduzindo os custos com utilização de túneis de vento no processo de aprendizagem dos cadetes. Outro fator relevante no processo de simulação é a capacidade de obtenção de resultados complexos envolvendo a criação de projetos de estudo que estejam atrelados à Teoria de Voo. Diversos aspectos envolvendo a disciplina podem ser abordados nas etapas de simulação, como a verificação da reação de um determinado aerofólio a outro tipos de fluidos, além de interpretação do desempenho do perfil no que diz respeito aos valores de Mach crítico ou comportamento dos perfis enflechados quando comparados com asas que não possuam essa característica.

Evidencia-se que o uso de plataformas que possibilitam o processo de escoamento do fluido ao redor de um perfil permite identificar de forma clara o processo físico envolvido com a interpretação dos resultados, tal fato corrobora-se com a geração dos coeficientes de sustentação, Fig.18, e de arrasto, Fig. 19, permitindo uma verificação dos conteúdos abordados na disciplina de Teoria de Voo.

**Figura 18** - Coeficiente de Sustentação do perfil NACA 4412

Fonte: O autor (2021)

**Figura 19** - Coeficiente de Arrasto do perfil NACA 4412

Fonte: O autor (2021)

## CONCLUSÃO

Ao finalizar esse trabalho foi possível observar a importância da Dinâmica dos Fluidos Computacional como ferramenta de aprendizagem extracurricular. Se atrelado ao conteúdo de Teoria de Voo permite uma melhor compreensão e aprofundamento nos assuntos abordados na disciplina.

A abordagem de assuntos envolvendo os conceitos físicos de aerodinâmica, precisamente no que diz respeito ao assunto de dinâmica de fluidos, atrelados a outras formas de visualização mais interativa, como a plataforma ANSYS WORKBENCH permite aos cadetes aprofundar e interpretar os conceitos aplicados interativamente. A utilização do perfil NACA 4412 como exemplo de aerofólio para análise de escoamento, com a geração da geometria obtida usando o banco de dados NACA, permitiu definir as coordenadas do aerofólio para se inserir na plataforma e analisar os conceitos físicos do comportamento do aerofólio em relação ao escoamento do fluxo. Em seguida foi possível realizar a geração do grid do volume de interesse que foi analisado (aerofólio) e por fim a simulação e análise dos resultados obtidos.

Esses resultados permitiram a visualização no formato 3D do escoamento do fluido sobre o perfil NACA 4412, podendo ser feito para qualquer outro perfil, desde que se tenha conhecimento das coordenadas do aerofólio. Dessa forma a utilização da plataforma ANSYS permite que os resultados que seriam obtidos com a utilização de modelos mais empíricos, fossem obtidos através de plataforma computacional, permitindo maior interação com a matéria e envolvimento dos cadetes em aerodinâmica.

As plataformas de simulação permitem que os cadetes obtenham outras formas de visualização, desde que sua utilização esteja atrelada e fundamentada em conceitos físicos envolvendo teoria de voo. A geração do fluxo sobre o aerofólio permite observar os diversos conceitos envolvendo o voo, como a presença de pontos onde ocorreu o descolamento da camada limite e permitiu o estol, a definição das características envolvendo a velocidade e geração de banco de dados com todos os limites operacionais e estruturais envolvendo o aerofólio que será estudado. Dessa forma observa-se a importância da Dinâmica dos Fluidos

Computacional para os cadetes no que diz respeito ao estudo de Teoria de Voo como forma de implemento aos conteúdos abordados na disciplina.

## REFERÊNCIAS

BAKKER, André. **Lectures on Applied Computational Fluid Dynamics**. Dartmouth College, 2008. Disponível em: <https://www.bakker.org/cfm/publications/Lectures-Applied-CFD.pdf>. Acessado em 20 fev. 2021.

CAMILO, Elizangela. **Solução numérica das equações de Euler para representação do escoamento transônico em aerofólios**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2003. doi:10.11606/D.18.2003.tde-24102005-174535. Acesso em: 31 out 2020.

CAMARGO, Eduardo Breitenbach. **Simulação computacional do perfil aerodinâmico eppler 423 variando o ângulo de ataque**. 2017. Trabalho final de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Faculdade Horizontina, Rio Grande do Sul, 2017.

HANNA, R.K. WEINHOLD , I. **The democratization of CFD. Mentor Graphics Corp. – Whitepaper Mechanical Analysis**, 01 – 22. Disponível em: <https://www.mentor.com>. Acessado em: 20 fev. 2021

FEFFERMAN, Charles L. **Existence and smoothness of the Navier-Stokes equation**. The millennium prize problems. 2006; 57(67):22.

FORTUNA, Armando de Oliveira. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

FOX, Robert W. , MCDONALD, Alan T. , & PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 08. ed. São Paulo: LTC Editora, 2004.

GÖRTZ, Stefan. **Realistic Simulations of Wing Aerodynamics Using Novel CFD Methods**. 2005. Sweden: KTH Aeronautical and Vehicle Engineering, 2005.

JOSÉ RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda. **Fundamentos da Engenharia Aeronáutica**. 01. ed. São Paulo: CENGAGE Learning, 2013.

KESSLER, M. **Fluidodinâmica computacional: o que é ?** 2006. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>. Acessado em 20 fev. 2021.

MARCUM, David L. **CFD Simulation and Visual Analysis of Complex Time-Dependent Flight Vehicle Flow Fields**. 2001. Mississippi: Mississippi State University - Air Force Office of Scientific Research, 2001.

MALISKA, Clovis R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 02. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora 200, 2004.

RAYMER, Daniel P. **Aircraft Design: A Conceptual Approach**. 02. ed. Washington, DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1992.

RODRIGUES, Anderson. **Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD): O que é? Para que serve? Porque usar**. 2017. Disponível em: <https://www.engenhariaearquitetura.com.br/2019/09/dinamica-dos-fluidos-computacional-cfd-o-que-e-para-que-serve-porque-usar>. Acesso em: 29 set. 2020.

SOUZA, Ericarla de Jesus. **O uso de jogos e simulação computacional como instrumento de aprendizagem : campeonato de aviões de papel e o ensino de hidrodinâmica**. 2015. 149 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Matemática) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2015.

TIPLER, Paul A. , & MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. 06. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

University of Illinois Urbana-Champaign. **UIUC Applied Aerodynamics Group**, 2021. UIUC Airfoil Coordinates Database. Disponível em: [https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord\\_database.html](https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html). Acesso em: 09 jul. 2021.

VIANA, Pedro. **Tipos de asa e sua aerodinâmica - Delta**. 2015. Disponível em: <https://www.aeroflap.com.br/tipos-de-asa-e-sua-aerodinamica-delta/>. Acessado em : 25 jun. 2021.

