

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

MATHEUS AZEVEDO SOARES DE SOUZA

APLICAÇÃO DE ANÁLISE CFD EM PERFÍS AERONÁUTICOS

TAUBATÉ

2017

MATHEUS AZEVEDO SOARES DE SOUZA

APLICAÇÃO DE ANÁLISE CFD EM PERFÍS AERONÁUTICOS

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Bacharel pelo Curso de Engenharia Aeronáutica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Orientador: Prof. Msc. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto

Área de concentração: fluidodinâmica computacional.

TAUBATÉ

2017

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / Unitau - Biblioteca das Engenharias**

S729a Souza, Matheus Azevedo Soares de
Aplicação de análise CFD em perfis aeronáuticos. /
Matheus Azevedo Soares de Souza. - 2017.

40f. : il; 30 cm.

Monografia (Graduação em Engenharia Aeronáutica) –
Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia
Mecânica e Elétrica, 2017

Orientador: Prof. Me Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto,

MATHEUS AZEVEDO SOARES DE SOUZA

APLICAÇÃO DE ANÁLISE CFD EM PERFIS AERONÁUTICOS

Trabalho de Graduação apresentado para a obtenção do Certificado de Bacharel pelo Curso de Engenharia Aeronáutica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de concentração:
fluidodinâmica computacional.

Data: 20/11/2019

Resultado: Aprovado

BANCA EXAMINADORA

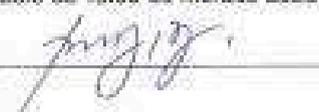
Prof. Msc. Pedro Marcelo Alves Ferreira Pinto

Universidade de Taubaté

Assinatura: 

Prof. Msc. Paulo de Tasso de Moraes Lobo

Universidade de Taubaté

Assinatura: 

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sempre me guiar, dar a força e inteligência necessária para superar as dificuldades para chegar até aqui onde estou.

A Universidade e seu corpo docente por todo apoio, infraestrutura e conhecimento disponibilizados durante o curso.

Ao meu orientador Pedro Marcelo pelo suporte, dedicação e correções durante todo o período de orientação.

Agradeço de forma especial ao meu pai Erze Nelva Soares de Souza e mãe Luziema Pereira de Azevedo por todo amor, apoio, incentivo e esforços necessários para a conclusão desta etapa.

As minhas irmãs pela confiança e amor transpassados de todas as formas possíveis.

A Igreja Batista do Povo de Taubaté que desde o início da minha jornada no curso, me presenteou com inúmeras amizades, que me incentivaram e me apoiaram até aqui.

Agradeço também aos companheiros de classe pelos momentos divididos juntos durante a caminhada.

RESUMO

Fluidodinâmica computacional (em inglês: Computational Fluid Dynamics – CFD) pode ser descrito de forma generalizada, como a simulação numérica de todos os processos físico-químicos que apresentam escoamento, ou seja, fluidodinâmica é a área de conhecimento que trata da simulação numérica de escoamento de fluídos, transferência de calor e fenômenos relacionados, como reações químicas, combustão, aeroacústica e etc. O CFD teve origem a partir da combinação de duas disciplinas: mecânica dos fluídos e cálculo numérico, e têm como objetivo prever o comportamento de um produto, processo ou material em determinadas condições assumidas pelo operador, reduzindo desempenhos inadequados e custos para a obtenção de resultados experimentais. Para a resolução do trabalho de graduação será utilizado o software baseado em CFD, Ansys CFX. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo CFD em análise de aerofólio, para gerar um modelo computacional eficiente e funcional para a análise de qualquer perfil aerodinâmico.

Palavras-chave: Fluidodinâmica computacional, CFD, perfil aerodinâmico.

ABSTRACT

Computational Fluid Dynamics (CFD) can be described in a generalized way, as the numerical simulation of all physical-chemical processes that have flow, that is, fluid dynamics is the area of knowledge that deals with the numerical simulation of flow of fluid, heat transfer and related phenomena's, such as chemical reactions, combustion, aeroacoustics and so on. The CFD originated from the combination of two disciplines: fluid mechanics and numerical calculus, and they aim to predict the behavior of a product, process or material under certain conditions assumed by the operator, reducing inadequate performances and costs to obtain results experiments. For the resolution of the graduation work will be used the software based on CFD, Ansys CFX. This work aims to develop a model for CFD application in airfoil analysis, to generate an efficient and functional computational model for the analysis of any aerodynamic profile.

Keywords: Computational fluid dynamics, CFD, aerodynamic profile.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de simulação e propriedades do material.....	29
--	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Influência do número de Reynolds na camada limite.	17
Figura 2: Influência do método descritivo na aproximação.	21
Figura 3: Processo de convergência de malha.	22
Figura 4: Sustentação e arrasto no perfil aerodinâmico.	23
Figura 5: Características do perfil aerodinâmico.	24
Figura 6: Características do perfil NACA.	25
Figura 7: Método de discretização dos volumes finitos.	26
Figura 8: Método escolhido na interface Workflow.	27
Figura 9: Modelo geométrico envolvido pela caixa de simulação.	28
Figura 10: Modelo geométrico com suas condições de fronteira.	28
Figura 11: Elementos de malha do modelo.	30
Figura 12: Visão ampliada do perfil com os elementos de malha.	30
Figura 13: Número de nós e elementos de malha do modelo.	31
Figura 14: Solver control.	32
Figura 15: Estabilização dos coeficientes CL e CD.	33
Figura 16: Influência do número de Mach no regime de escoamento.	34
Figura 17: Distribuição de pressão no perfil NACA 0012.	35
Figura 18: Temperatura no regime de escoamento proposto.	36
Figura 19: Camada limite.	37

LISTA DE SIGLAS

CAD – Desenho Assistido por Computador (Computer Aided Design, em inglês)

CD – Coeficiente de Arrasto (Drag Coefficient, em inglês)

CFD – Fluidodinâmica Computacional (Computational Fluid Dynamics, em inglês)

CL – Coeficiente de Sustentação (Lift Coefficient, em inglês)

NACA – Comitê Nacional para Aconselhamento sobre Aeronáutica (em inglês National Advisory for Aeronautics)

NASA – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (em inglês, National Aeronautics and Space Administration)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. Fluido.....	14
2.2. Reynolds	15
2.3. Mach	16
2.4. Camada Limite.....	17
2.5. Equação de Bernoulli.....	18
2.6. Fluidodinâmica computacional	19
2.7. Perfil Aerodinâmico	23
3. METODOLOGIA.....	25
3.1. Pesquisa e Leitura dos Trabalhos na Literatura:	25
3.2. Modelagem Computacional:.....	26
3.2.1 Discretização da malha:.....	29
3.2.2. Controle da solução (<i>Solver Control</i>):.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES:.....	33
4.1. Número de Mach:	34
4.2. Distribuição de pressão:.....	35
4.3. Temperatura:	36
4.4. Camada limite:.....	37
5. CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

Um fluido é caracterizado como uma substância que se deforma continuamente, quando submetida a uma força tangencial constante, em outras palavras, fluido é uma substância que submetida a uma força tangencial constante, não atinge uma nova configuração de equilíbrio estático. A principal característica de qualquer fluido está relacionada a propriedade de não resistir a deformação, esta propriedade é proveniente da sua incapacidade de suportar tensão de cisalhamento em equilíbrio estático. Os fluidos possuem duas classificações bem específicas, fluido newtoniano e fluido não newtoniano, a classificação está associada à tensão, linear ou não-linear.

A mecânica dos fluidos é a ciência que estuda o comportamento físico dos fluidos, assim como as leis que regem esse comportamento. Os Aspectos teóricos e práticos da mecânica dos fluidos são de fundamental importância para a solução de diversos problemas encontrados habitualmente na engenharia, suas principais aplicações são destinadas ao estudo de escoamento de qualquer fluido, sendo dividido em dois ramos, estática dos fluidos e dinâmica dos fluidos. A estática dos fluidos trata-se do estudo do escoamento em condições não usuais, onde as propriedades e leis físicas que regem o comportamento não levam em conta as forças externas ao processo estudado. A dinâmica dos fluidos é o estudo do escoamento, transporte de massa e comportamento dos fluidos em diferentes regimes, que leva em conta as forças externas ao processo de escoamento.

A fluidodinâmica computacional (em inglês *Computational Fluid Dynamics* ou CFD), é a área do conhecimento que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento, a fluidodinâmica é a combinação de duas disciplinas, a mecânica dos fluidos e o cálculo numérico, utilizando equações de origem na mecânica dos fluidos e resolvidas pela utilização de métodos numéricos. A fluidodinâmica é utilizada para obter as distribuições de velocidades, pressões e temperaturas na região de escoamento. A fluidodinâmica computacional, CFD, é amplamente utilizada em diferentes segmentos do mercado, apoiando projetos e fabricação de aviões, automóveis, navios e diversos equipamentos utilizados na indústria. O CFD pode ser aplicada desde a fase conceitual de um projeto, auxiliando a determinar a viabilidade do

projeto, até a etapa de produção, possibilitando o estudo e caracterização do escoamento em qualquer tipo de ambiente.

Na aeronáutica o uso da ferramenta CFD é de suma importância, pois os fenômenos relacionados com o movimento de fluidos podem ser bastante complexos, onde análises teóricas, somente, podem não descrever esses fenômenos de forma adequada, principalmente nos escoamentos encontrados em problemas na engenharia. Indo de encontro a essas dificuldades o CFD possibilita uma série de estudos e caracterizações de problemas presentes na aeronáutica, como o estudo e análise da aerodinâmica de perfis aeronáuticos, estudo de perfis de asa em regimes laminar e turbulento, estudo de transferência de calor, aeroacústica, entre várias outras aplicações.

Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo CFD em análise de aerofólio, afim de gerar um modelo computacional eficiente e funcional para a análise de qualquer perfil aeronáutico. Para tanto, será utilizado o software referência em análise CFD presente no mercado, Ansys CFX.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fluido

Fluido, por definição, é qualquer elemento que têm a capacidade de escoar, ou que se deforma de maneira contínua quando submetida a forças tangenciais, que quando submetida a uma força tangencial constante, não atinge uma nova configuração de equilíbrio estático (BRUNETII, 2005).

Os fluídos podem ser do tipo líquidos, gasosos, plasmas, entre outros, e são classificados como fluídos newtonianos ou não-newtonianos, ou, fluidos lineares ou não-lineares, respectivamente. Os fluidos newtonianos são fluídos que apresentam taxa de deformação diretamente proporcional à tensão aplicada, essa deformação é ocorre de forma linear, e corresponde a classificação da maioria dos fluídos como água, óleo, etc. Os fluídos não-newtonianos são fluídos que não respondem de forma linear à tensão aplicada. As principais propriedades de um fluído são a viscosidade cinemática, pressão, massa específica, massa específica relativa e definição de fluido ideal (GRAEBEL, 2001).

Os fluidos vêm sendo estudados há muitos anos, de várias formas, como os egípcios que desenvolveram relógios com base de funcionamento em água, Aristóteles que descreveu o princípio da continuidade, Arquimedes que definiu o princípio do empuxo, Leonard Euler que deduziu equações de movimento de fluidos, etc. Fluidos em movimentos estão presentes em toda a natureza, no corpo humano, na forma de escoamento da circulação sanguínea, na água, em forma de correntes de rios e marés, e no ar, com os ventos. Os fluidos também estão presentes na forma mecânica em máquinas industriais, como máquinas hidráulicas em geral, máquinas de fluxos, mangueiras, entre outras (RODRIGUES).

Quando um fluido está sob o efeito de esforços tangenciais, determinamos que o fluido está em escoamento. A fluidez do fluido está relacionada com a capacidade do fluido de escoar. Há dois tipos de regime de escoamento, regime laminar e regime turbulento. O regime laminar ocorre quando as partículas que compõe o fluido se movem em trajetórias bem

definidas, apresentando camadas laminares, cada uma delas preservando sua característica no meio. No escoamento laminar a viscosidade age no fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência (YOUNG, 2010). O escoamento laminar geralmente ocorre em regimes de baixas velocidades e em fluidos com valores de viscosidade altos. O escoamento turbulento ou fluxo turbulento ocorre quando as partículas de um fluido não se movem ao longo de trajetórias bem definidas, ou seja, as partículas descrevem trajetórias irregulares, com movimentos aleatórios e complexos, ocorrendo geralmente em regimes que apresentam alta velocidade e meios com baixa viscosidade. (BRUNETTI, 2005).

A viscosidade, μ , segundo a lei de Newton, é a propriedade que impõe uma proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade do fluido. Essa grandeza é uma propriedade de cada fluido e de suas condições de operação, como, a pressão e temperatura de utilização. A viscosidade é oriunda de uma coesão entre as moléculas e pelos choques entre elas, para melhor visualizar, realizou-se a famosa experiência de duas placas, onde é possível observar que através da aplicação de uma força constante na placa superior, a placa assume uma velocidade constante, pelo equilíbrio dinâmico da força externa por forças desenvolvidas internamente. (BRUNETTI, 2005).

2.2. Reynolds

O número de Reynolds (Re) é um número adimensional utilizado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido dentro de um tubo ou sobre uma superfície. A equação que rege o número de Reynolds está presente nas equações 1 e 2:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad \text{Eq. 1}$$

Re , Número de Reynolds; ρ , massa específica do fluido; v , velocidade do escoamento; D , área da superfície e μ , viscosidade dinâmica do fluido.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot \bar{c}}{\mu} \quad \text{Eq. 2}$$

Re, Número de Reynolds; ρ , massa específica do fluido; v , velocidade do escoamento; \bar{c} , corda média aerodinâmica e μ , viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Reynolds é utilizado para determinar o regime do escoamento, sendo o número de Reynolds menor que 2000, o escoamento é caracterizado como laminar. Sendo o número de Reynolds maior que 2000 e menor que 2400, o escoamento é caracterizado como transitório. Sendo o número de Reynolds maior que 2400, o regime de escoamento é caracterizado como turbulento.

2.3. Mach

Além da representação de Reynolds para regimes de escoamento, existe outra constante muito importante que representa o regime de escoamento do fluido, o número de Mach. O número de Mach, dado pelas equações 3 e 4, é um valor adimensional que representa a relação entre a velocidade do fluxo mensurado e a velocidade local do som. (YOUNG, 2010) (GRAEBEL, 2001).

$$M = \frac{u}{c} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde M, é o número de Mach; u , é a velocidade local do fluxo e c , é a velocidade do som no meio.

$$M = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad \text{Eq. 4}$$

Onde M, é o número de Mach; γ é a razão de calor específico; R é a constante de um gás ideal; T é a temperatura.

Os regimes de escoamento são subdivididos em função do número de Mach, regime subsônico para número de Mach menor que 0,8, regime transônico

para valores de Mach entre 0,8 e 1,2, regime supersônico para números de Mach entre 1,2 e 5 e hipersônico para números de Mach entre 5 e 10.

2.4. Camada Limite

A partir do momento que um determinado objeto começa a se movimentar em torno do fluido, ou o contrário, o fluido se movimentado em torno do objeto, as moléculas do fluido perturbam o objeto gerando forças aerodinâmicas entre o fluido e o objeto. A potencialidade desta interação entre fluido e objeto depende de parâmetros como velocidade do escoamento, massa do objeto, viscosidade do fluido, compressibilidade, entre outros.

Quando o objeto está sob algum tipo de escoamento, em um fluido, as moléculas do fluido próximas à superfície se aderem ao objeto, pois, as moléculas acima da superfície são mais lentas em suas colisões em comparação com as moléculas que estão próximas à superfície, ressaltando que a velocidade do escoamento do fluido na superfície do objeto é zero. À medida que as moléculas do fluido se afastam da superfície do objeto, menor é sua colisão com o mesmo, isto cria uma fina camada de fluido perto da superfície, criando o efeito denominado de camada limite (NASA, 2017).

Existem dois tipos de camada limite, laminares ou turbulentas, classificadas de acordo com o número de Reynolds (Figura 1).

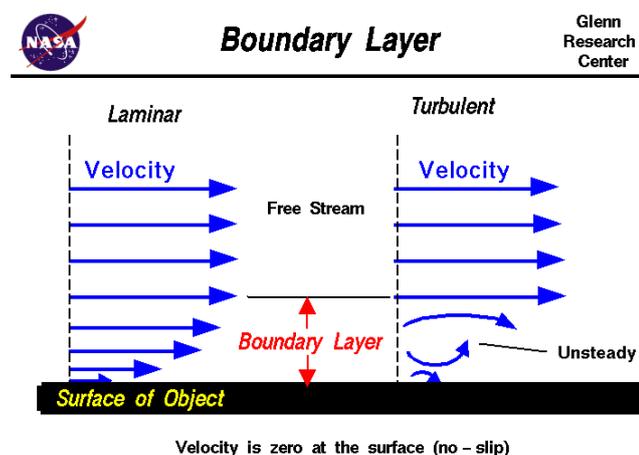


Figura 1 - Influência do número de Reynolds na camada limite.

Fonte - NASA, 2017.

A principal diferença entre o estado laminar e turbulento da camada limite é a estabilidade do escoamento em ambos os estados, sendo o laminar bem mais estável que o turbulento e gera menos arrasto de fricção no perfil. O fluxo da camada limite em torno de um objeto começa no estado laminar, à medida que aumenta a espessura do objeto e sua velocidade o fluxo passa por uma fase de transição para o regime turbulento. Laminaridade é a propriedade utilizada para descrever a porcentagem que um determinado objeto consegue se manter em regime laminar na camada limite, por exemplo, um perfil aeronáutico que possui laminaridade de 70%, consegue manter a camada limite em regime laminar até 70% de sua corda. Do ponto de vista aerodinâmico é aconselhável ter a transição de fluxos com maior porcentagem possível, sendo que você quer manter as propriedades da camada limite estáveis na maior parte do perfil.

2.5. Equação de Bernoulli

Outra equação bastante conhecida na mecânica dos fluidos é a equação de Bernoulli. A equação de Bernoulli afirma que o aumento da velocidade de um fluido ocorre simultaneamente com uma diminuição na pressão ou uma diminuição na energia potencial do fluido. A equação de Bernoulli é aplicada em diferentes tipos de fluxo, inclusive para escoamentos incompressíveis, onde a equação possui baixo número de Mach, e escoamentos compressíveis, onde a equação possui número de Mach elevado. O princípio de Bernoulli é oriundo da equação de conservação de energia, que pode ser descrita pela equação 5:

$$p + \rho \cdot g \cdot y + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{constante} \quad \text{Eq. 5}$$

A equação de Bernoulli nada mais é que a representação da soma da pressão atmosférica, pressão estática e pressão dinâmica respectivamente, onde p é a pressão, ρ é a densidade, g aceleração da gravidade e v a velocidade.

2.6. Fluidodinâmica computacional

A fluidodinâmica computacional (em inglês *Computational Fluid Dynamics* ou CFD), é a área do conhecimento que estuda métodos computacionais para simulação de fenômenos que envolvem fluidos em movimento, a fluidodinâmica é a combinação de duas disciplinas, a mecânica dos fluidos e o cálculo numérico, utilizando equações de origem na mecânica dos fluidos e resolvidas pela utilização de métodos numéricos. A fluidodinâmica é utilizada para obter as distribuições de velocidades, pressões e temperaturas na região de escoamento. A fluidodinâmica computacional, CFD, é amplamente utilizada em diferentes segmentos do mercado, apoiando projetos e fabricação de aviões, automóveis, navios e diversos equipamentos utilizados na indústria. O CFD pode ser aplicada desde a fase conceitual de um projeto, auxiliando a determinar a viabilidade do projeto, até a etapa de produção, possibilitando o estudo e caracterização do escoamento em qualquer tipo de ambiente.

Na aeronáutica o uso da ferramenta CFD é de suma importância, pois os fenômenos relacionados com o movimento de fluidos podem ser bastante complexos, onde análises teóricas, somente, podem não descrever esses fenômenos de forma adequada, principalmente nos escoamentos encontrados em problemas na engenharia (FORTUNA, 2000).

Indo de encontro a essas dificuldades, o CFD possibilita uma série de estudos e caracterizações de problemas presentes na aeronáutica, como o estudo e análise da aerodinâmica de perfis aeronáuticos, estudo de perfis de asa em regimes laminar e turbulento, estudo de transferência de calor, aeroacústica, entre várias outras aplicações (ESSS).

O CFD é a junção de duas grandes áreas, a mecânica dos fluidos e métodos numéricos, a resolução de problemas que englobam a atitude de um fluido em qualquer meio, facilitada pelo uso de ferramentas computacionais. Para a analisar um fluido de forma genérica, utiliza-se a equação 5 que atua de forma mais abrangente em softwares baseados em fluidodinâmica computacional, a equação de transporte variável (KESSLER, 2016).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot dA + \int_V S_\phi dV \quad Eq. 6$$

A maior parte das equações de conservação resolvidas em fluidodinâmica computacional (CFD) possuem a forma acima, com os quatro termos dependentes, termo de tempo, termo adjectivo, termo difusivo e termo fonte respectivamente. Para representar diferentes tipos de equações de conservação são alteradas as variáveis ϕ , o coeficiente de difusão Γ e a fonte S , para representar a equação de conservação de massa por exemplo, basta igualar a variável ϕ a 1, mantendo os coeficientes de difusão e fonte nulos. A equação genérica de conservação descrita acima, apesar de ser amplamente utilizada ainda não existe solução analítica, sendo assim é necessário reescrevê-la em forma algébrica e resolvê-la por algum método descritivo (KESSLER, 2016).

Para superar os problemas analíticos mencionados, o CFD apresenta uma solução descritiva para qualquer regime de escoamento, abrangendo inúmeras áreas, como escoamento do ar em motores, medição da energia gerada em parques eólicos, análise de escoamento em perfis de asa, entre outros. Porém o software precisa entender e interpretar a necessidade do operador, de encontro a essas necessidades, a resolução de qualquer software CFD é composta por 2 etapas de processamento, pré-processamento e pós-processamento.

O pré-processamento é a etapa da análise utilizada para o software entender a necessidade do operador. A etapa de pré-processamento é dividida em 3 grandes áreas, definição dos objetivos e domínio da simulação, modelagem e geração de malha (MIRLISSENA, 2016).

A definição dos objetivos da simulação é feita primeiramente através da inserção de constantes, funções simplificadas e seleção dos modelos físicos, que não só definem o regime de escoamento que será utilizado, laminar ou turbulento, como também define propriedades únicas ao sistema analisado, como viscosidade do fluido, velocidade, entre outras, que podem ter total influência no resultado. Outra propriedade de extrema importância definida no pré-processamento é a condição de contorno. As condições de contorno são restrições determinadas ao modelo, que representam ao software CFD as funções e conseqüentemente as características desejadas a simulação numérica.

O processo de modelagem é a criação do modelo 3D em softwares CAD, com a intenção de construir modelos que expliquem as características desejadas

para a análise de escoamento. No processo de criação da geometria, é de suma importância a definição dos materiais que os constituem, bem como suas propriedades, pois elas definirão o comportamento do modelo no escoamento. Algumas propriedades que podem ser adotadas, em relação a materiais sólidos: resistência, condutividade térmica, entre outras, em relação a fluidos: viscosidade, massa específica, massa específica relativa, entre outras.

A geração de malha é a etapa do pré-processamento que realiza a discretização do modelo matemático, de maneira geral, os problemas fluidodinâmicos são contínuos e seu espaço de soluções podem ser infinitos. O método de discretização é a aproximação de um problema contínuo por um problema discreto, cuja solução está presente em um espaço de dimensões finitas, essa discretização é utilizada justamente porque passamos um problema contínuo onde a função original está definida em um domínio infinito, para um problema discretizado, o domínio é representado por intervalos finitos, cada intervalo é uma representação do problema original, ou seja, quanto menor a segmentação do domínio (Figura 2), mais a função se aproximará e representará o problema (SOUZA, 2003).

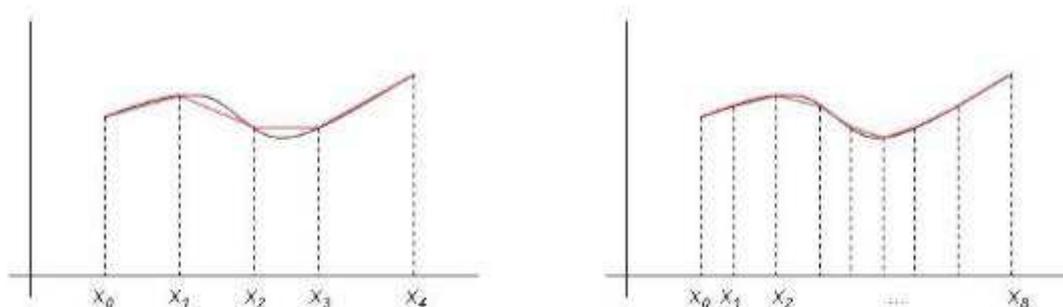


Figura 2 - Influência do método descritivo na aproximação.

Fonte - SOUZA, 2003.

Note que quanto maior o número de segmentação do problema maior a similaridade do problema em relação ao original.

A ideia básica de qualquer método de discretização consiste em dividir um domínio contínuo em sub-regiões de geometria simples que represente de melhor forma a sua geometria (Figura 3), onde um número infinito de variáveis

desconhecidas sejam substituídas por um número limitado de elementos com comportamento conhecido, essas divisões podem apresentar inúmeras formas, como triangular, quadrilateral, tetraédrica, hexaédrica, entre outras (SOUZA, 2003).

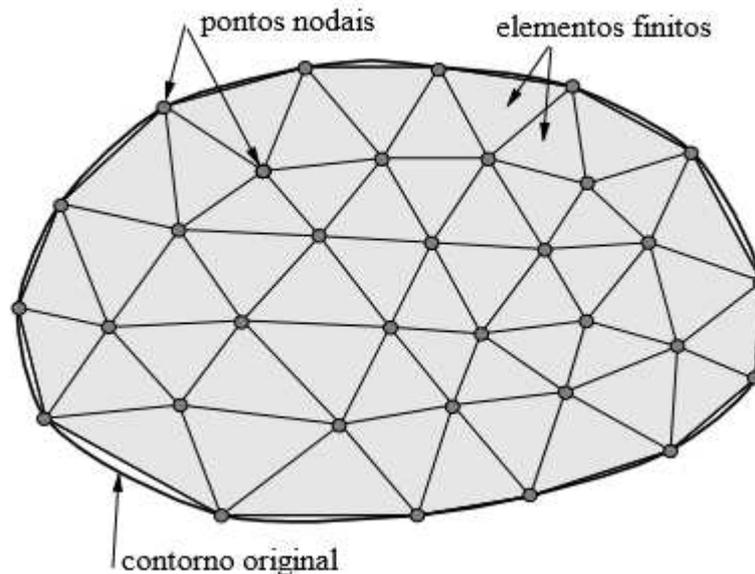


Figura 3 - Processo de convergência de malha.

Fonte - SOUZA, 2003.

O nome elemento finito se deve ao domínio descrito apresentar dimensões finitas, não possuindo qualquer relação com os elementos infinitesimais utilizados no cálculo integral ou diferencial. Cada elemento finito tem a sua própria interação, e são conectados entre si por pontos denominados pontos nodais, o conjunto elemento finito e ponto nodal é conhecido como malha. A precisão da análise é diretamente proporcional ao número de elementos convergidos na malha e ao gasto computacional empregado na análise, quanto maior o número de elementos, mais preciso o resultado, porém maior o gasto computacional que será necessário para a realização dessas tarefas.

A resolução através de métodos descritivos é uma solução aproximada, sendo assim os softwares de simulação computacional vêm evoluindo e aprimorando a maneira como o software vê o problema, melhorando as análises abordadas, melhorando a escolha do elemento de malha, criação e geração do modelo, condições de contorno e apresentação dos resultados.

Os métodos de discretização mais utilizados na engenharia são o método de elementos finitos, método de diferenças finitas e o método dos volumes finitos, sendo o último o mais utilizado quando se trata de simulação CFD. O método de volumes finitos possui a ideia do método de discretização aplicada em pequenos volumes, denominado volume de controle, utilizando a equação citada anteriormente para cada volume de controle, gerando equações que descrevem comportamentos relacionados a balanço de massa, energia e quantidade de movimento a qualquer volume de meio contínuo.

Após a definição de todas as etapas do pré-processamento, dá-se início a etapa de pós-processamento. O pós-processamento é responsável pela obtenção de todos resultados (2D e 3D), animações, gráficos e tabelas da região de interesse, que podem ser validados através de resultados obtidos experimentalmente ou resultados obtidos analiticamente.

Neste trabalho a análise CFD será utilizada para analisar o efeito do escoamento em perfis aerodinâmicos.

2.7. Perfil Aerodinâmico

Perfil aerodinâmico é um corpo que movimentado em um fluido, possui a capacidade de produzir forças aerodinâmicas. A componente paralela ao movimento é denominada sustentação (no inglês *Lift*) e a componente paralela à direção do movimento é denominado arrasto (no inglês *Drag*) (BABINSKY, 2003), como pode ser visualizado na Figura 4:

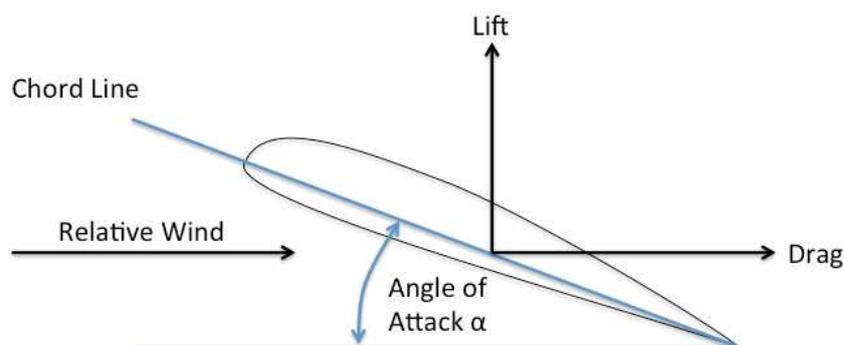


Figura 4 - Sustentação e arrasto no perfil aerodinâmico.

Fonte - AVIATIONCHIEF, 2017.

A definição mais aceita na comunidade acadêmica de como a sustentação e o arrasto são gerados no perfil aerodinâmico, é a definição do teorema de Bernoulli, onde as forças aerodinâmicas são oriundas de uma diferença de pressão, onde o fluido se desloca mais rápido na parte inferior do perfil em comparação com a parte superior. Neste caso a diferença de pressão pode ser gerada de duas formas, se o perfil aerodinâmico possui uma curvatura ou se o perfil possui uma inclinação em relação ao vento relativo, que é a direção do fluxo de escoamento.

Os principais parâmetros aerodinâmicos do perfil de aerodinâmico como mostrados na Figura 5 são: bordo de ataque, bordo de fuga, curvatura da asa (*camber*), superfície superior, superfície inferior, posição da espessura máxima e espessura.



Figura 5 - Características do perfil aerodinâmico.

Fonte - MAZZOCATO, 2017.

Cada um desses parâmetros tem influência no valor de sustentação e desempenho gerado pelo perfil. Esses parâmetros geram inúmeros gráficos que serão estudados neste trabalho, sendo eles, os valores de C_L , C_D que representam a variação do coeficiente de sustentação e arrasto ao longo do perfil (KLAUS, 2011), a pressão gerada ao longo do perfil, a influência do número de Mach em torno do perfil e atuação da camada limite no modelo que será estudado.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho é dividida em três etapas: Pesquisa, leitura dos trabalhos na literatura e modelagem computacional. A seguir, descreve-se com mais detalhes a utilização da ferramenta computacional para as simulações de perfis aeronáuticos (Ansys CFX), aspectos básicos sobre os modelos de simulação e análise dos resultados.

3.1. Pesquisa e Leitura dos Trabalhos na Literatura

A pesquisa dos trabalhos na literatura foi feita através de dois recursos, o google acadêmico e periódicos capes. Através das pesquisas realizadas foi selecionado o perfil aeronáuticos NACA 0012 para utilização, já que se trata de um perfil aeronáutico simples e bastante consolidado na literatura.

Os perfis NACA são modelos de aerofólios desenvolvidos pela (*National Advisory Committee for Aeronautics*), que posteriormente se tornou NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Os aerofólios NACA são classificados e descritos por uma combinação de 4 a 6 dígitos, em sua maioria por uma combinação de 4 dígitos, que definem as seções do perfil, seguindo os parâmetros descritos na figura 6.

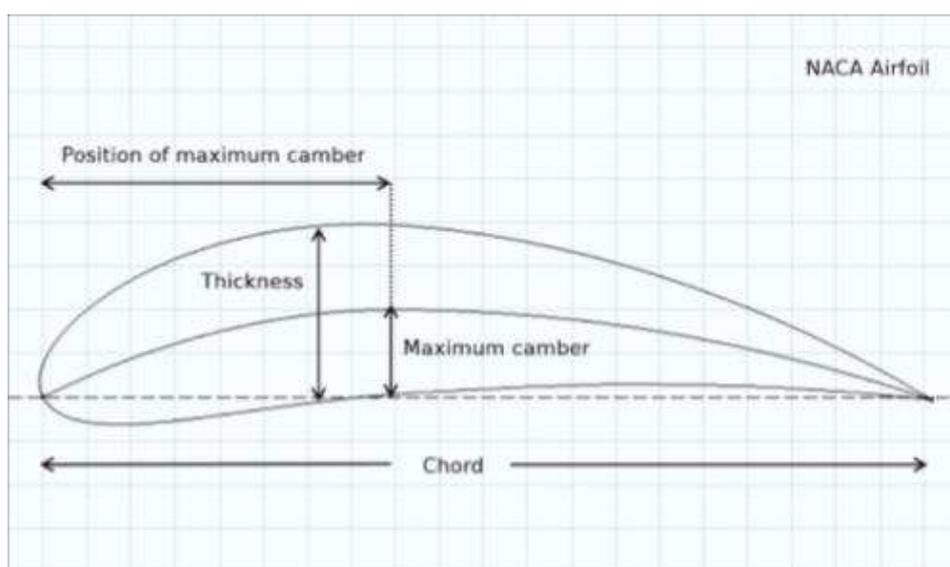


Figura 6 - Características do perfil NACA.

Fonte - SCHLEGEL. F, 2016.

Em perfis NACA de 4 dígitos, os perfis seguem a seguinte combinação:

O primeiro dígito descreve a máxima porcentagem de curvatura (*camber*) da corda.

O segundo dígito descreve a máxima distância de curvatura (*camber*) do bordo de ataque em relação a corda.

Os dois últimos dígitos descrevem a espessura máxima do perfil em relação a porcentagem da corda.

Se utilizarmos o perfil NACA 2412 como exemplo, ele possui um máximo curvatura de 2%, localizado a 40% do bordo de ataque e possui uma espessura de 12% em relação a corda.

No caso do perfil aeronáutico escolhido neste trabalho, o perfil NACA 0012, possui uma curvatura e distância máxima de curvatura de 0%, e possui uma espessura de 12% em relação a corda.

3.2. Modelagem Computacional

A modelagem e a simulação computacional dos perfis aeronáuticos foram realizadas com o uso do software comercial Ansys CFX. As rotinas numéricas utilizadas pelos softwares são baseadas no método dos volumes finitos. O método dos volumes finitos consiste na troca do domínio contínuo pela discretização do domínio computacional (geração de malha) e aproximações diferenciais, onde um conjunto de elementos denominados, volumes de controle, são utilizados para representar o domínio original, como é demonstrado na figura 7 abaixo.

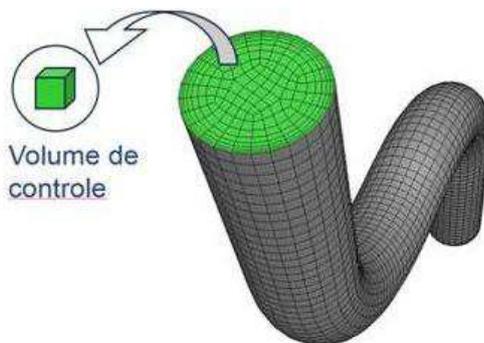


Figura 7 - Método de discretização dos volumes finitos.

Fonte - KESSLER. M, 2016.

O software comercial Ansys CFX é um módulo de simulação que está inserido na plataforma Ansys Workbench, que permite a simulação de inúmeras áreas de conhecimento como estruturas mecânicas, eletromagnetismo, mecânica dos fluidos, termodinâmica, acústica, entre outros. A plataforma Ansys possui uma interface (*workflow*), figura 8, que guia o usuário por classes de problemas físicos em análise e definição de parâmetros básicos da simulação, que devem ser escolhidos de acordo com a necessidade do usuário, além de instruir como deve ser o passo a passo da simulação utilizando o método de elementos finitos, onde deve ser definido a geometria, o número de elementos de malha, as condições de contorno (*Setup e Solution*) e apresentação dos resultados. A simulação no software Ansys CFX possui três sessões, CFX-PRE para definição dos parâmetros, CFX-SOLVER para solução das equações empregadas no escoamento e CFX-POST para visualização dos resultados desejados.

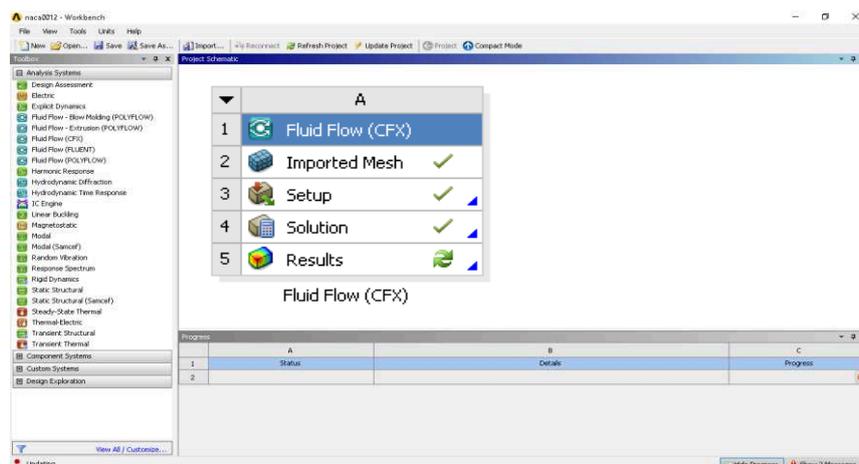


Figura 8 - Método escolhido na interface Workflow.

Fonte - Próprio autor.

Os modelos geométricos foram desenhados no próprio Ansys, no interior de uma caixa de simulação (*background*), figura 9, que possui índice de refração $\eta=1$, simulando uma caixa de ar. A caixa de simulação é necessária para excitar o perfil com as forças e estipular as propriedades empregadas pelo próprio usuário. Neste trabalho, a condição de fronteira foi utilizada na caixa de simulação (*background*) e no perfil para expressar que a simulação se tratava do escoamento em um modelo 2D e possui as seguintes configurações, figura 10.

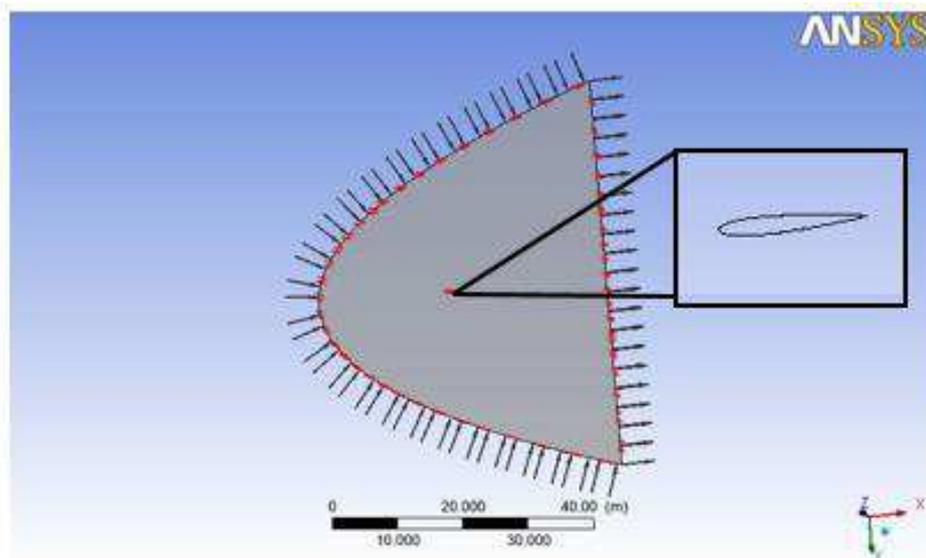


Figura 9 - Modelo geométrico envolvido pela caixa de simulação.

Fonte - Próprio Autor.

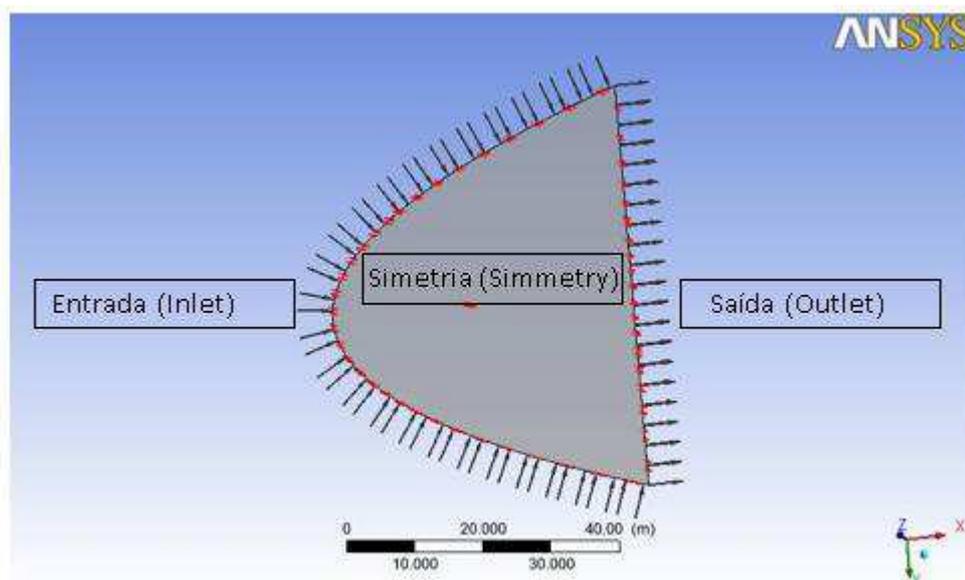


Figura 10 - Modelo geométrico com suas condições de fronteira.

Fonte - Próprio autor.

Condição de entrada (*Inlet*): Esta condição de contorno é utilizada na face arredondada da geometria para indicar a entrada adotada para o escoamento.

Condição de simetria (*Simmetry*): Esta condição de contorno é utilizada nas faces laterais da geometria para indicar que o modelo geométrico (2D) representa a simulação de um domínio extenso (3D).

Condição de saída (*Outlet*): Esta condição de contorno é utilizada na face posterior da geometria para indicar a saída adotada para o escoamento e sua pressão estática de operação.

Para definir o tipo de simulação desejada pelo usuário é necessário a implementação de parâmetros obrigatórios, conhecidos como condições de contorno, que restringem a simulação e delimita as equações que serão empregadas pelo CFX-Solver. As condições de contorno estabelecidos para esta simulação estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de simulação e propriedades do material.

Número de Mach	0.7
Temperatura	288 K
Número de Reynolds	9×10^6
Viscosidade	0,01820 Kg/m.s
Velocidade do som	340,17 m/s
Velocidade	238,12 m/s
Densidade do ar	0,688 kg/m ³
Constante dos gases	287
Pressão estática	56867 Pa
Ângulo de incidência	1,49°

Fonte - Próprio autor.

3.2.1 Discretização da malha

Para obtermos êxito na simulação é necessário que a modelagem de malha utilizada para este trabalho apresente uma excelente malha na região da camada limite, para assim, obter sucesso nos resultados. Como procedimento de modelagem, antes de realizarmos os estudos propostos neste trabalho, é preciso estabilizar a solução e reduzir o gasto computacional, garantindo a confiabilidade dos resultados e a diminuição do tempo de simulação. Para reduzir o gasto computacional, foi realizada uma alteração, onde se utilizou de

um modelo 2D do perfil. O efeito das alterações na malha, figuras 11 e 12, no número de elementos de malha e pontos nodais, figura 13, e dimensão da caixa de simulação tem total influência no perfil NACA 0012, já que se trata de um perfil simétrico, facilitando a geração de malha.

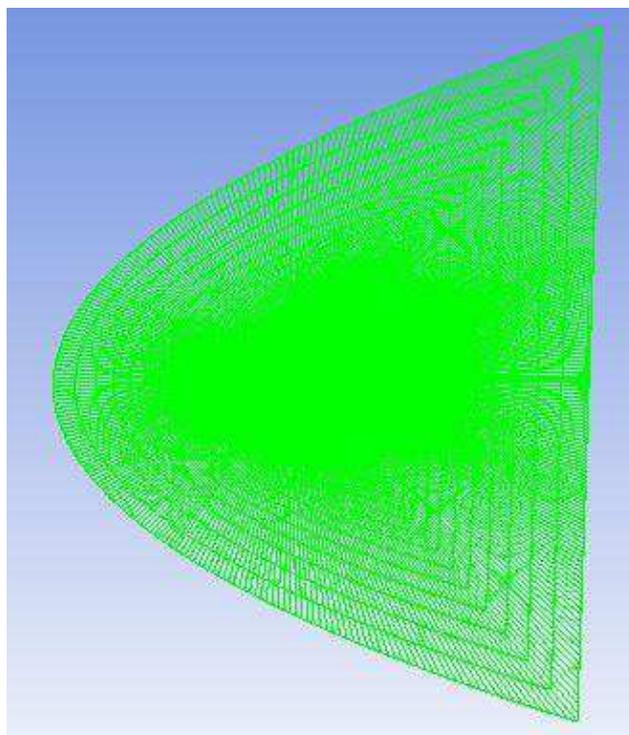


Figura 11 - Elementos de malha do modelo.

Fonte - Próprio autor.

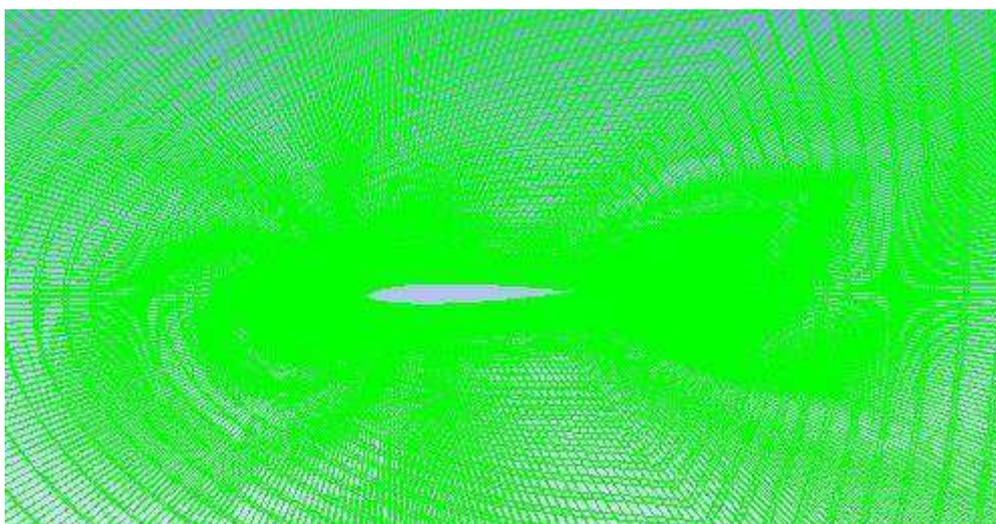


Figura 12 - Visão ampliada do perfil com os elementos de malha.

Fonte - Próprio autor.

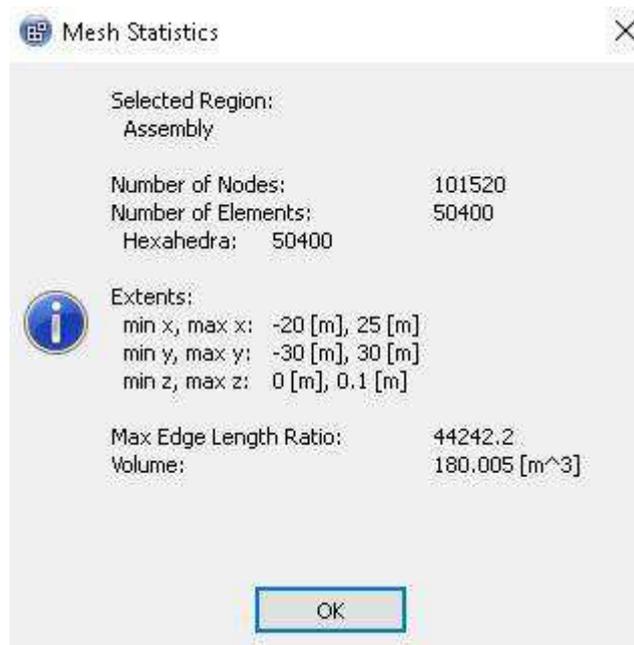


Figura 13 - Número de nós e elementos de malha do modelo.

Fonte - Próprio autor.

Como pode se visualizar na Figura 11, é necessário que o número de elementos de malha em torno do perfil seja muito maior que no entorno da caixa de simulação, isso é devido à complexidade do efeito da camada limite no perfil, exigindo que a malha seja extremamente refinada, para assim mostrar um resultado aproximado e confiável do regime de escoamento proposto neste trabalho. O refinamento de malha é diretamente proporcional ao esforço computacional empregado para a resolução do problema, podendo interferir diretamente na convergência dos resultados. Para garantir que a malha empregada atende a simulação desejada, o mesmo deve comprovar que a geometria do domínio está bem representada pelos elementos de malha, figuras 10 e 11, neste caso foi validada a malha utilizada para a simulação.

3.2.2. Controle da solução (*Solver Control*)

Este é o último passo antes de disparar a simulação. O controle da solução (*Solver Control*) tem como objetivo estipular os parâmetros de solução e adequá-los, afim de otimizar suas aplicações e garantir uma boa convergência de malha no resultado final.

As especificações de controle de solução (*Solver Control*) utilizadas neste estudo estão descritas na figura 14.

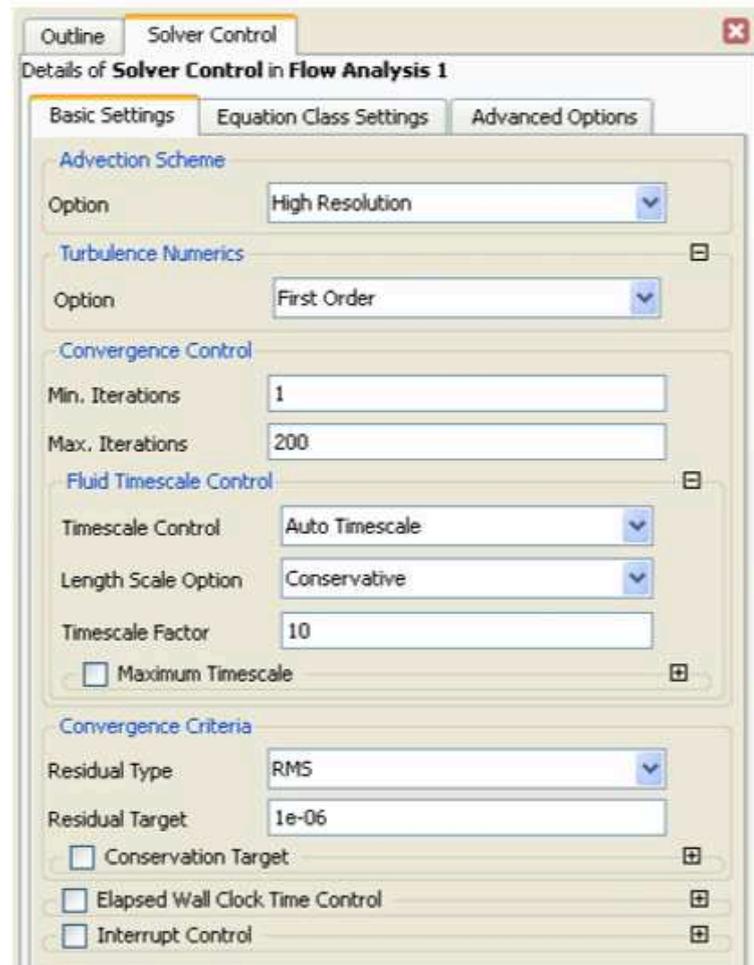


Figura 14 - Solver control.

Fonte - Próprio autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma análise CFD funcional para o perfil NACA 0012, apresentando os seguintes resultados de escoamento no perfil:

- Número de Mach;
- Distribuição de pressão;
- Temperatura;
- Camada limite;

Para considerar confiável os resultados fornecidos, após a simulação, além das especificações mostradas na seção metodologia, eram necessários a estabilização dos coeficientes de sustentação (C_L) e arrasto (C_D) conforme o número de interações aumentava no (Accumulated time step), visualizados logo após o termino da simulação, figura 15.

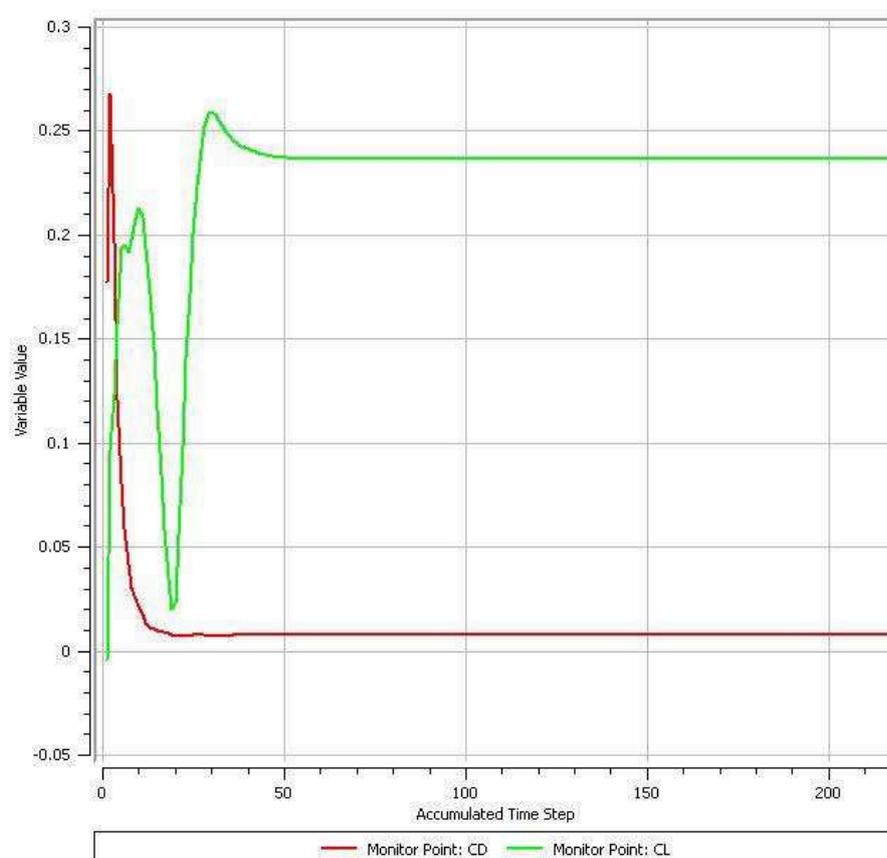


Figura 15 - Estabilização dos coeficientes C_L e C_D .

Fonte - Próprio autor.

O comportamento dos parâmetros descritos acima sob o perfil NACA 0012, serão apresentados a seguir:

4.1. Número de Mach

A influência do número de Mach no perfil aerodinâmico é demonstrada na figura 16. A ilustração do número de Mach no perfil é separado por um gradiente de cores situado no canto esquerdo superior da figura.

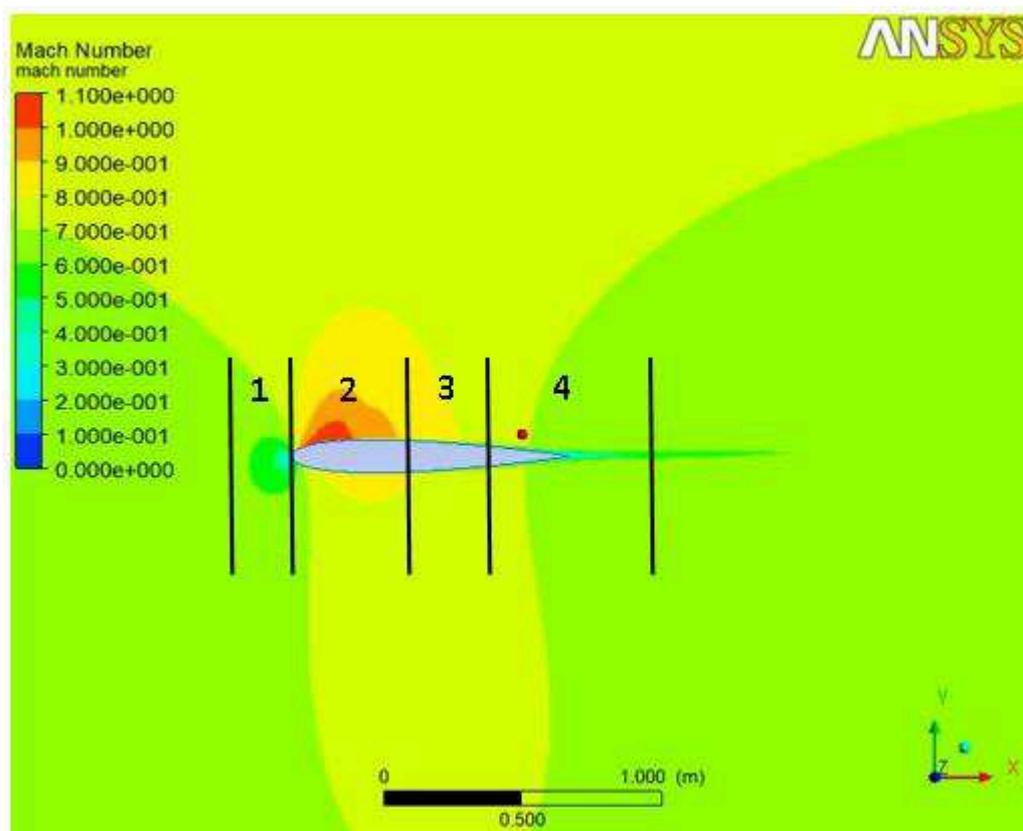


Figura 16 - Influência do número de Mach no regime de escoamento.

Fonte - Próprio autor.

Como é possível visualizar na figura 16, o perfil apresenta duas regiões de baixa velocidade e número de Mach, a região 1, entrada do escoamento no bordo de ataque do perfil e a região 4, saída do escoamento no bordo de fuga. A região 1, entrada de escoamento no bordo de ataque, apresenta uma região de aceleração nula e uma região de baixa aceleração subsequente devido ao efeito do ponto de estagnação no perfil. Nas regiões do perfil mais próximas ao

bordo de fuga da aeronave, região 4, o escoamento apresenta um regime de desaceleração, isto ocorre para indicar a perda da laminaridade do perfil, conseqüentemente, a entrada da camada limite do perfil em regime turbulento.

Também é possível visualizar uma região de maior aceleração do escoamento no perfil, isto ocorre porque a região 2 é a região em que o escoamento se adere de melhor forma ao perfil, possuindo um maior gradiente de velocidades.

Na região 3 inicia o regime de desaceleração do perfil, também chamado de ponto de separação, o escoamento começa a perder contato com a superfície e a camada limite laminar começa a desaparecer.

4.2. Distribuição de pressão

A distribuição de pressão no perfil pode ser visualizada na Figura 17.

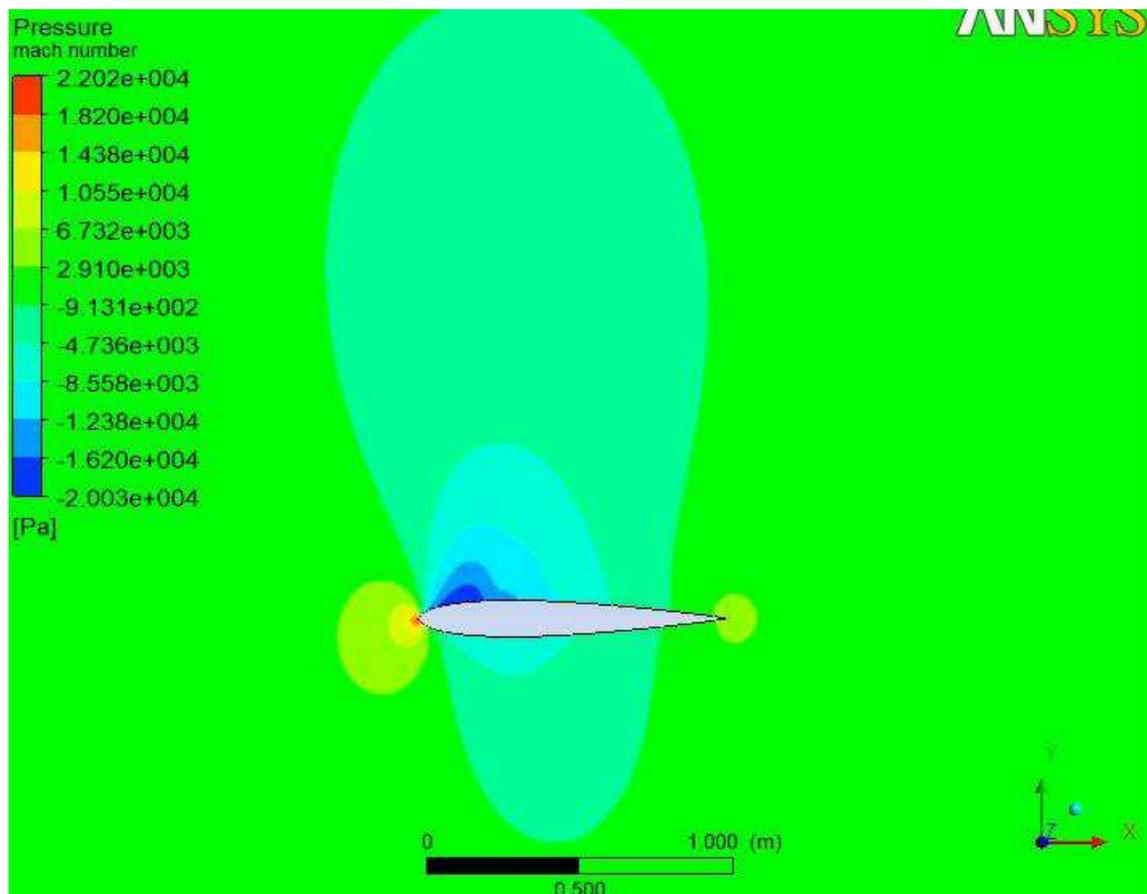


Figura 17 - Distribuição de pressão no perfil NACA 0012.

Fonte - Próprio autor.

Pode-se perceber que os valores de pressão no gráfico da Figura 17 são extremamente elevados na região de bordo de ataque e bordo de fuga do perfil aerodinâmico, em comparação com as demais regiões do gráfico. Isto se deve a ocorrência do efeito de pressão de estagnação, que é a somatória das pressões estáticas, pressão oriunda das forças termodinâmicas do fluido; Pressões dinâmicas, associada a velocidade do escoamento.

Já a diferença de distribuição de pressão da parte superior e inferior do perfil se deve a inclinação de $1,49^\circ$ estipulado nas condições de simulação.

4.3. Temperatura

A influência da temperatura no perfil aerodinâmico pode ser visualizada na Figura18.

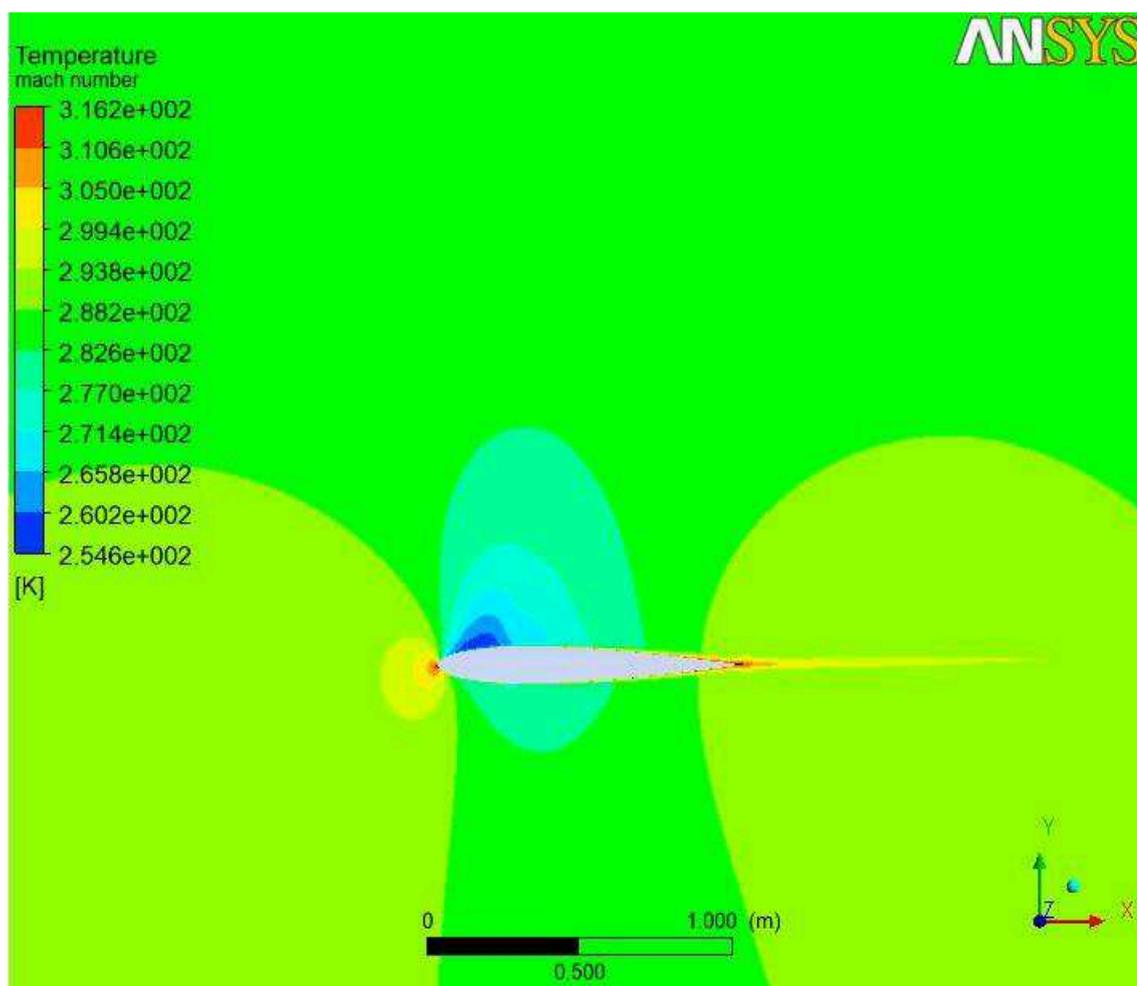


Figura 18 - Temperatura no regime de escoamento proposto.

Fonte - Próprio autor.

É possível perceber que o gráfico de influência da temperatura no perfil, figura 18, e o gráfico de distribuição de pressão do perfil, figura 17, apresentam uma certa semelhança, isto ocorre segundo a equação do gás de estado ideal, equação 7:

$$p.v = n.R.T \quad \text{Eq.7}$$

Onde p , é a pressão; v , é o volume; n , é o número de mols do gás; R , é a constante universal dos gases perfeitos e T , é a temperatura.

Segundo a equação dos gases ideais o parâmetro temperatura é diretamente proporcional a pressão, sendo assim quanto maior a pressão no perfil aerodinâmico maior será a temperatura naquela região.

4.4. Camada limite

Os efeitos da viscosidade e camada limite no perfil NACA 0012 são apresentados na figura 19.

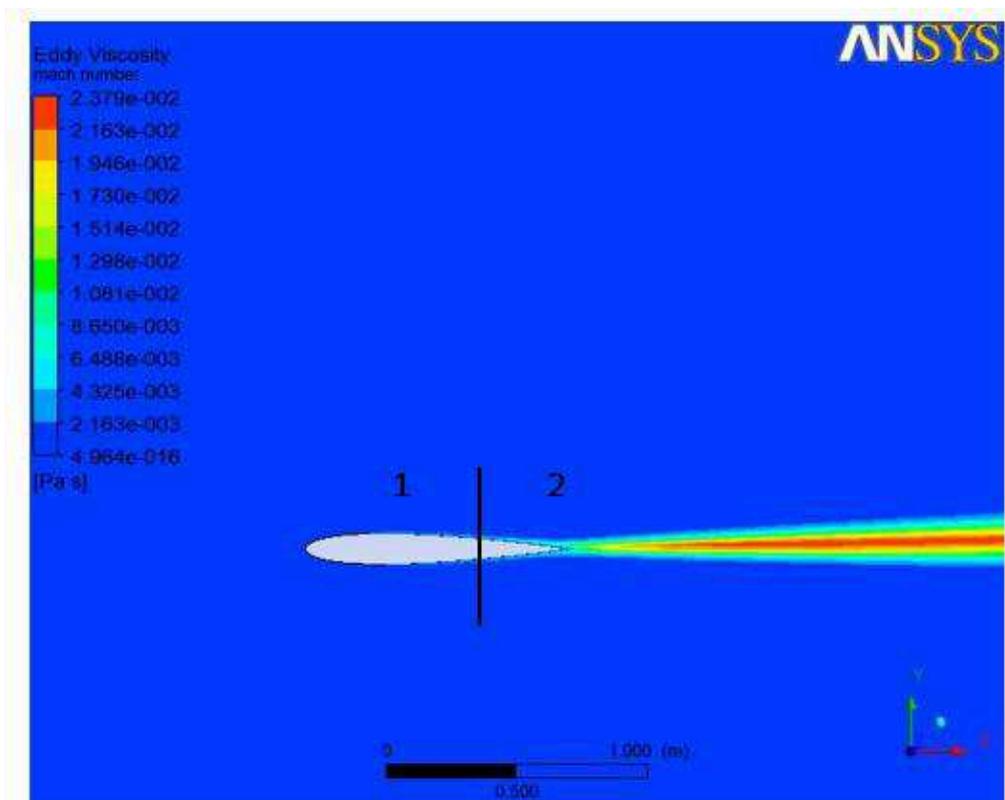


Figura 19 - Camada limite.

Fonte - Próprio autor.

A região 1 é apresentada a região de camada limite laminar, nela o escoamento adere perfeitamente a superfície, significando aproximadamente 70% do escoamento no perfil aerodinâmico. Na região de transição, denominado ponto de separação, é onde ocorre o início da camada limite turbulenta. A região 2 simboliza a camada limite turbulenta, onde o escoamento perde a sua característica laminar, ilustrado pela região vermelha do gráfico.

5. CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que a rotina e planejamento metódicos utilizados na metodologia e aplicados no trabalho são satisfatórios e concisos, representando o essencial para a realização de uma simulação em fluidodinâmica de sucesso, podendo ser aplicado a qualquer modelo de perfil aerodinâmico.

Os resultados obtidos, estabilização dos valores de CL e CD bem como a ótima fluidez do gradiente de cores apresentado nos gráficos, demonstraram a qualidade da malha discretizada utilizado na simulação.

Por último, podemos perceber que os resultados obtidos, número de Mach, distribuição de pressão, temperatura e camada limite, apontaram a qualidade da plataforma CFD adotada para este estudo. Os resultados de uma simulação fictícia do perfil NACA 0012 sob um regime de escoamento, apresentaram resultados satisfatórios e confiáveis, podendo-se afirmar que o resultado representa, dentro das especificações utilizadas, valores que se aproximam da realidade.

REFERÊNCIAS

AIRFOILTOOLS **NACA2411 AIRFOIL-IL** Disponível em <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca2411-il> acesso em: 10 de agosto de 2017.

AVIATIONCHIEF **ÂNGULO DE ATAQUE** Disponível em <http://www.aviationchief.com/angle-of-attack.html> acesso em: 23 de outubro de 2017.

BABINSKY. H. **HOW DO WINGS WORK**, Physisc Education, 2003.

BRUNETTI. F. **MECÂNICA DOS FLUIDOS**, 2º Edição, 2005.

ESSS. **PROCESSO DE SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA (CFD)** Disponível em <http://www.esss.com.br/blog/2016/07/processo-de-simulacao-fluidodinamica-cfd/> Acesso em: 18 de maio de 2017.

FORTUNA. A. O. **TÉCNICAS COMPUTACIONAIS PARA DINÂMICA DOS FLUIDOS CONCEITOS BÁSICOS E APLICAÇÕES**, 2000.

GRAEBEL. W. P. **ENGINEERING FLUID MECHANICS**, Taylor & Francis, p 16, 2001.

KESSLER. M. **FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL: O QUE É** Disponível em <http://www.esss.com.br/blog/2016/06/fluidodinamica-computacional-o-que-e/> Acesso em: 14 de maio de 2017.

KLAUS. W. M. **I THE CAUSE OF THE AERODYNAMIC LIFTING FORCE IS THE DOWNWARD ACCELERATION OF AIR BY THE AIRFOIL**, Physics of Flight – reviewed, 2011.

MAZZOCATO. D. **GEOMETRIA DE UM PERFIL AERODINÂMICO** Disponível em http://www.kitesurfmania.com.br/school_det.asp?id_article=94&id_category=10 Acesso em: 24 de outubro 2017.

MIRLISENNA. G. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITO O QUE É** Disponível em <http://www.esss.com.br/blog/2016/01/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/> Acesso em: 16 de maio 2017.

NASA **BOUNDARY LAYER GLEEN RESEARCH CENTER** Disponível em <https://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/boundlay.html> Acesso em: 23 de outubro 2017.

RODRIGUES. L. E. M. **MECÂNICA DOS FLUÍDOS** Disponível em <http://www.engbrasil.eng.br/pp/mf/mef.pdf> Acesso em: 18 de maio de 2017.

SCHLEGEL. F. **OPTIMIZE NACA AIRFOIL DESIGNS WITH A SIMULATION APP** Disponível em <https://br.comsol.com/blogs/author/fabrice-schlegel/> Acesso em: 10 de agosto de 2017.

SOUZA. R. M. **O MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS APLICADOS A CONDIÇÕES DE CALOR** Disponível em <http://www.inf.ufes.br/~luciac/fem/livros-fem/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf> Acesso em: 16 de maio de 2017.

YOUNG. D. F.; BRUCE. R. M.; THEODORE. H. O.; WADE. W. H. **A BRIEF INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS**, 5 ed, John Wiley & Sons, p 95, 2010.