



MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS À ENGENHARIA: UMA ABORDAGEM CONCEITUAL E PROPOSTA DE EMPREGABILIDADE DE METODOLOGIA ATIVA DE ENSINO

CARLOS HENRIQUE DE SOUSA

carlos.sousa@aedb.br

AEDB

FARNEY COUTINHO MOREIRA

farney.coutinho@aedb.br

AEDB

MARILIA RIOS DE PAULA

marilia.rios@aedb.br

AEDB

Resumo: No decorrer dos anos, em paralelo com as revoluções tecnológicas, as empresas vêm criando e evoluindo seus produtos para se manter em um mercado cada vez mais competitivo. Contudo, é preciso recrutar profissionais com mão de obra extremamente qualificada e específica para suprir suas necessidades. Os engenheiros proporcionam uma contribuição bastante considerável na etapa de criação dos produtos. A formação desse profissional habilita-o a criar e desenvolver modelos que sejam úteis e descrevam os sistemas que compõem um prédio, uma casa, um maquinário, um veículo, um processo produtivo, entre outros bens que a sociedade demanda para consumo, além de soluções inovadoras com o foco na qualidade de vida das pessoas. Para que haja êxito, os modelos que hoje estão inseridos no universo CAD/CAE, devem se aproximar o máximo da realidade. As características geométricas criadas em CAD devem ser simuladas em CAE com a estimativa das mais variadas condições de trabalho que o objeto enfrentará em funcionamento normal e crítico. A identificação de fenômenos presentes no funcionamento real é fundamental para o desenvolvimento da modelagem, além do entendimento de toda a interpretação física em paralelo com a diversidade de recursos numéricos e computacionais integrados. A tendência é que o ambiente fabril seja cada vez mais digital com o avanço da Indústria 4.0. O setor de

projetos, que vem evoluindo aceleradamente em termos de recursos computacionais, demandará engenheiros que tenham um considerável domínio de ferramentas virtuais inovadoras. Aplicações de Realidade Aumentada, Impressão 3D e Realidade Virtual já são realidade nesse segmento, de modo a substituir softwares existentes. Para preparar o profissional para esse novo conceito de indústria, um novo modelo de educação está sendo inserido nas instituições de ensino. O que é denominado “Escola 4.0” tem como filosofia a participação ativa do aluno, deixando o professor apenas como agente orientador do processo.

Palavras Chave: Engenharia - CAE - Simulação Numérica - Metodologia Ativa -

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento científico se caracteriza por buscar explicações sobre eventos e objetos físicos, químicos, biológicos e afins, de acordo com determinados critérios de aceitação sobre o que pode ser uma explicação, uma boa explicação ou uma melhor explicação. Nesse processo, observações, conjecturas, experimentos, verificações, refutações, conceitos, modelos, teorias, estão na essência da construção do conhecimento científico. Ou seja, este conhecimento é construído, depende das perguntas feitas, das definições, das metáforas, dos modelos utilizados. (MOREIRA, 2013).

O engenheiro é o profissional capacitado a projetar bens e serviços nas mais variadas áreas utilizando conhecimentos técnicos e científicos inerentes ao seu campo de formação e atuação. Suas ferramentas de trabalho, que até meados do Século XX eram utilizadas de forma manual, ganhou mais agilidade e precisão com a intervenção de computadores que o auxiliam nas análises e tomadas de decisão em projetos e controle.

Atualmente, empresas de engenharia se deparam com vários desafios durante seus projetos. Todo o processo associado ao desenvolvimento de um equipamento, produto ou estrutura deve apresentar um bom balanceamento de fatores cruciais, como qualidade, custo e tempo, e o cenário observado nos dias de hoje traz diversas dificuldades para que se atinja este equilíbrio. Por exemplo, a complexidade dos produtos é cada vez maior, os recursos (tanto humanos como de matéria-prima) são mais escassos e os prazos para a conclusão dos projetos e lançamento de produtos mais curtos. (SILVA, 2017)

A engenharia conta com *softwares* especializados no desenvolvimento de novos produtos. Essa tecnologia é conhecida como *CAE* (*Computer Aided Engineering* ou Engenharia Assistida por Computador) e engloba toda uma série de sistemas que auxiliam o profissional desde a análise da física básica até sistemas mais complexos. Apesar de simplificar o processo de desenvolvimento de projetos, a correta operação deles requer um engenheiro que possua conhecimento nas ciências físicas e capacidade de abstração para criar um modelo computacional a partir de um produto real. (SOFTWARE, 2016)

Nos dias atuais, frequentemente os professores que lecionam modelagem sólida utilizando *software CAD* (*Computer Aided Design* ou Desenho Assistido por Computador) nas universidades se deparam com um problema: a heterogeneidade da turma, relacionada ao conhecimento dos recursos e a aplicações dos *softwares*. É comum ter na turma alunos com conhecimentos sólidos e experiência na área, pois trabalham diariamente com elaboração de projetos em *CAD*. Por outro lado, a maior parte dos alunos não tem ou não teve nenhum contato com tais recursos. Além disso, na moderna conjuntura atual, não há mais sentido em basear as aulas em tutoriais e utilização sequencial de recursos, pois inúmeros *sites*, *blogs*, fóruns virtuais e redes sociais podem fazer esse serviço, sem a necessidade do professor. (CASTELAN, MILANEZ, FRITZEN, 2017)

O presente artigo tem interesse em enfatizar as simulações por Métodos Numéricos direcionadas ao desenvolvimento de produtos e provar que a expansão no processo de aprendizagem dessa técnica é de caráter obrigatório na formação de Engenharia, tomando como exemplo aplicações no âmbito da Engenharia Mecânica, onde a empregabilidade desses recursos é extremamente predominante. É muito importante conscientizar-se de que esse tipo de trabalho não condiz apenas com o fato de inserir dados de entrada, executar o comando de cálculo e coletar os dados de saída; há uma extensa fundamentação que precisa ser explorada pelo

estudante, unindo os conceitos absorvidos desde o ciclo básico e os aparatos computacionais contidos nos *softwares*.

2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

2.1. OBJETIVO GERAL

Demonstrar a importância do estudo profundo da modelagem e simulação utilizando recursos numéricos nos cursos de engenharia, mais especificamente no curso de Engenharia Mecânica, por meio de uma simulação restrita a análise de escoamento de ar em uma asa aerodinâmica, por meio de ferramenta *CFD (Computation Fluid Dynamics)*. Esse estudo é muito comum no desenvolvimento de aviões em geral, automóveis e barcos de alta performance. Por fim, sugerir um modelo de aprendizagem, embasado nos princípios de Metodologia Ativa, buscando uma dinâmica mais eficiente no processo de ensino de simulações por Métodos Numéricos e Projetos Mecânicos.

De acordo com a citação de Gamboa (2014), o CFD é uma ferramenta numérica poderosa e que pode ser utilizado em duas vertentes: Investigação e Projeto. Em investigação, o CFD é utilizado fundamentalmente como uma ferramenta de comparação, entre resultados numéricos com outro tipo de resultados, analíticos ou experimentais. Na vertente de projeto, o CFD é utilizado em praticamente todos os ramos de engenharia, pois com os modelos físicos e de discretização apropriados, pode-se simular qualquer tipo de escoamento e obter resultados viáveis.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.2.1.** Explicar detalhadamente os princípios matemáticos na discretização das malhas, com base na teoria da dinâmica de escoamento de Navier-Stokes aplicada ao Método dos Volumes Finitos.
- 2.2.2.** Relatar o passo a passo da preparação do modelo para a simulação na extensão Fluent no Ansys Student, assim como suas limitações.
- 2.2.3.** Realizar a simulação computacional, considerando condições de contorno aproximadas a um comportamento real.
- 2.2.4.** Realizar o ensaio experimental da geometria do modelo CAD impresso em 3D no túnel de vento.
- 2.2.5.** Comparar os resultados teóricos e experimentais.

2.3. JUSTIFICATIVA

A utilização da simulação para modelagem de eventos físicos dominou o campo de desenvolvimento de produtos. Prever o comportamento de componentes sob inúmeras condições de trabalho é um fator imprescindível para que o engenheiro tenha uma visão panorâmica dos efeitos que esses eventos proporcionarão ao produto. Isso permite que o profissional tenha total controle das variáveis-chaves e alcance uma solução ótima.

Contudo, não basta saber identificar os fenômenos físicos inerentes aos eventos estimados, é preciso conhecer e usufruir de ferramentas matemáticas para modelá-los, buscar resultados que sejam credíveis e, conseqüentemente úteis para tomadas de decisão fundamentais ao longo do escopo de um determinado projeto.

Métodos Analíticos, Numéricos e Experimentais são as alternativas disponíveis para atingir essas respostas. Segundo Silva (2017), os métodos analíticos representam soluções baseadas em fórmulas matemáticas, desenvolvidas geralmente de forma manual, em que são definidas variáveis de entrada para o cálculo de uma ou mais variáveis de saída. Entretanto, cálculos analíticos apresentam aspectos que limitam a sua aplicabilidade para casos práticos. Por exemplo, as equações geralmente contemplam características físicas e de operação relativamente idealizadas, muito simplificadas se comparadas com o que se observa na realidade, ou são restritas às condições específicas previstas no cálculo.

Métodos Experimentais dependem de protótipos físicos do equipamento ou produto, construídos em escala real ou reduzida, que são submetidos a um ensaio que representa uma determinada condição de operação. Porém, o desenvolvimento de testes experimentais exige um maior investimento, não apenas por conta do custo de construção do protótipo, mas também para disponibilizar a infraestrutura necessária para os ensaios. Além disso, o processo de desenvolvimento pode exigir a realização de múltiplas iterações até atingir um design adequado, com impacto direto no tempo e custo do projeto. (SILVA, 2017)

Na solução por meio de Métodos Numéricos é desenvolvido um protótipo virtual do produto de interesse, representado por um sistema de equações fundamentadas em uma teoria matemática, como Método de Elementos Finitos (MEF), por exemplo. Este modelo pode ser construído diretamente em softwares comerciais de simulação numérica ou mesmo por meio de um código de programação próprio desenvolvido pelo engenheiro. Trata-se de uma abordagem que equilibra os pontos positivos das demais: embora demande um investimento razoavelmente superior ao método analítico (por conta de infraestrutura de hardware, licenças de software e treinamento dos usuários), o custo é significativamente inferior a um ensaio experimental; por sua vez, apesar da modelagem numérica considerar hipóteses simplificadoras em relação à realidade, é possível obter uma representação muito próxima ao comportamento de um protótipo físico. (SILVA, 2017)

Contudo, pode-se afirmar com convicção que o caminho mais eficaz é o dos Métodos Numéricos, principalmente se tratando de modelos complexos. Dependendo do projeto, é necessário construção de protótipos para coleta de dados específicos, para reduzir incertezas ou para dar suporte na criação dos modelos teóricos. Porém, geralmente o uso de softwares acaba sendo mais econômico para as empresas, apesar de demandar um investimento inicial.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. PRINCÍPIOS FÍSICOS

A seguir, serão mencionados os principais conceitos físicos que integram uma análise de escoamento sobre um sólido submerso, além da técnica utilizada para análises experimentais, possibilitando explorar protótipos em escala reduzida. Nesse caso, a impressão 3D tem sido uma grande aliada para obtenção desses objetos para buscar dados que podem direcionar o pesquisador na criação de modelos teóricos computacionais.



3.1.1. ABORDAGEM DIFERENCIAL X ABORDAGEM INTEGRAL DE ESCOAMENTOS

No estudo da dinâmica no campo da Mecânica dos Fluidos, existem duas abordagens distintas destinadas a casos particulares de análise: Abordagem na forma integral e na forma diferencial.

No primeiro caso, conforme Fox (2014), estuda-se uma região do espaço conforme o fluido escoar através dela. A Equação (1) é a forma genérica de expressar que a taxa de variação de uma determinada propriedade extensiva do sistema N equivale a soma da taxa de variação da quantidade da propriedade N dentro do volume de controle e a taxa na qual a propriedade N está saindo da superfície do volume de controle.

$$\frac{dN}{dt} \Big|_{\text{sistema}} = \frac{\partial \int_{Vc} \eta \rho \, dV}{\partial t} + \int_{SC} \eta \rho \, \vec{V} \, d\vec{A} \quad (1)$$

Por outro lado, segundo o mesmo autor, utiliza-se a abordagem na forma diferencial quando o interesse é analisar detalhadamente o escoamento. Esse tipo de análise é embasada em termos de sistemas e volumes de controle infinitesimais. As forças que atuam sobre um elemento fluido podem ser classificadas como força de campo e forças de superfície. Observando a Figura 1, tomando apenas a componente x, da força dm e volume $dV = dx dy dz$, somente as tensões que atuam na direção x darão origem a forças de superfície na direção x.

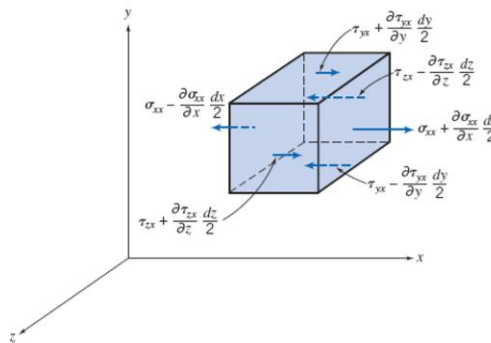


Figura 1: Tensões atuantes no eixo x em um elemento diferencial
Fonte: Fox, 2014

Introduzindo a equação de esforços atuantes descrita na Equação (2), multiplicando as tensões pelo diferencial de área, na Segunda Lei de Newton (3) temos a equação de movimento com relação ao eixo x. Colocando as tensões em função de gradientes de velocidade e de propriedades de fluidos, alcançamos a solução mais coerente dessa equação de movimento (4), globalmente conhecida como Equação de Navier-Stokes.

$$dF|_x = \left(\rho g_x + \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (2)$$

$$dF|_x = dm \left(\frac{Du}{Dt} \right) = dm \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial t} \right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

A mesma ideia é aplicada para as direções y e z, descrita nas Equações (5) e (6)

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} \right) = \rho g y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} \right) = \rho g z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

3.1.2. ANÁLISE DIMENSIONAL E SEMELHANÇA

Conforme White (2018), a análise dimensional é um método para reduzir o número e a complexidade de variáveis experimentais que afetam um dado fenômeno físico, pela aplicação de um tipo de técnica de compactação. Se um fenômeno depende de n variáveis dimensionais, a análise dimensional reduzirá o problema a apenas k variáveis adimensionais, em que a redução n-k = 1, 2, 3 ou 4, dependendo da complexidade do problema. Embora sua finalidade seja reduzir as variáveis e agrupá-las em forma adimensional, a análise dimensional tem vários benefícios adicionais. Um deles é que a mesma fornece as leis de escala, que permitem converter dados de um modelo pequeno e barato para obter as informações para um protótipo maior e caro. Quando a lei de escala é válida, dizemos que existe uma relação de semelhança entre o modelo e o protótipo. No caso mais simples, é obtida a semelhança se o número de Reynolds for o mesmo para o modelo e para o protótipo.

3.1.3. FORÇAS DE ARRASTO E FORÇAS DE SUSTENTAÇÃO

Uma das principais variáveis de saída de uma análise aerodinâmica é a força. Esta, oriunda da distribuição de pressão gerada pelo contato do ar com as superfícies do objeto, pode ser favorável ou desfavorável para o projeto. Este é o principal motivo pelo qual esta variável deve ser analisada, visando a redução ou aumento de sua intensidade e a direção e sentido ideal do vetor.

De acordo com Fox (2014), o arrasto (*drag force*) é a componente da força sobre o corpo que atua paralelamente à direção do movimento relativo. Essa força pode ser resultante de atrito puro entre o escoamento e a superfície da placa, de modo que as partículas de ar tendem a deslizar na superfície e o atrito entre ambos faz com que force o corpo em direção contrária ao movimento; de pressão pura quando o escoamento é perpendicular à superfície de escoamento, de modo que as partículas de ar tendem a colidir frontalmente com a superfície do corpo também gerando o esforço contrário ao movimento; e de pressão e atrito atuando simultaneamente.

Segundo Fox (2014), a sustentação é definida como a componente da força do fluido perpendicular ao movimento do fluido. Elas podem ser direcionadas para baixo (*down force*), com o objetivo de melhor estabilidade; e para cima (*lift force*), como o objetivo de levantar o objeto proporcionando condição de voo. Geralmente *down force* está mais direcionadas para veículos terrestres de alta performance e *lift force* está totalmente relacionada com asas de aviões e veículos aéreos.

3.2. MECÂNICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

Os seguintes itens farão uma breve conceituação de toda a extensão computacional em uma análise dinâmica dentro da Mecânica dos Fluidos, também mundialmente conhecida como CFD. Essa técnica une recursos computacionais para solucionar métodos numéricos aplicados a soluções específicas para sistemas de Equações Diferenciais Parciais que descrevem escoamentos em um determinado meio.

3.2.1. CONCEITO DE MALHA E DISCRETIZAÇÃO

Uma malha computacional pode ser definida como um conjunto de pontos e elementos que descrevem uma região ou geometria de análise. Esses elementos são polígonos conectados pelos pontos (formando os nós) e por suas faces, que ao serem unidos devem se aproximar do objeto de estudo. Em cada elemento existe uma conceituação matemática, geralmente formada por sistemas de Equações Diferenciais que são solucionadas por métodos específicos de maneira que haja continuidade entre os elementos vizinhos. Toda essa execução é denominada discretização.

Na essência, a discretização é o processo pelo qual uma expressão matemática, seja ela uma função ou equações na forma diferencial ou integral envolvendo funções, todas as quais são vistas como tendo valores contínuos infinitos de valores em algum domínio, são aproximadas por expressões análogas que prescrevem valores apenas em um número finito de pontos ou volumes discretos no domínio. (ANDERSON, 1995)

A Figura 2 ilustra um exemplo de malha criada para análise aerodinâmica de um avião.

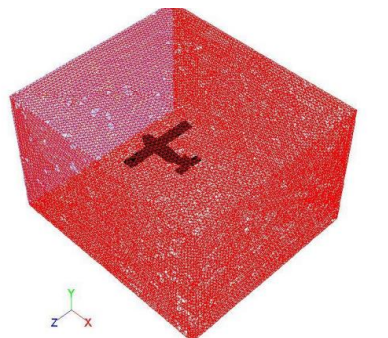


Figura 2: Criação e discretização de malha para análise aerodinâmica
Fonte: Koch e Zapparoli (2010)

3.2.2. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

Dentre os métodos de resolução numérica para sistemas de Equações Diferenciais, o método abordado nesse estudo é o Método dos Volumes Finitos. A necessidade de solucionar as Equações de Navier-Stokes implica a utilização de recursos específicos, ao passo que o mesmo também é direcionado para solucionar casos com esse perfil.

Soluções analíticas de equações diferenciais parciais envolvem casos específicos com expressões que dão a variação das variáveis dependentes continuamente ao longo do domínio. Em contrapartida, soluções numéricas podem dar respostas especificamente em pontos discretos no domínio. (ANDERSON, 1995)

Segundo Osses (2016), uma importante propriedade desse método é que os princípios de conservação (massa, momentum e energia), que são a base da modelagem matemática para a mecânica do contínuo, por definição, são respeitadas pelas equações deduzidas por método de volumes finitos. O método não se limita somente a problemas de mecânica de fluídos, e, de forma geral, envolve os seguintes passos:

1. Decompor o domínio em volume de controle;
2. Formular as equações integrais de conservação para cada volume de controle;
3. Aproximar numericamente as integrais;
4. Aproximar os valores das variáveis nas faces e as derivadas com a informação das variáveis nodais;
5. Montar e resolver o sistema algébrico obtido;

3.2.3. FLUID FLOW – ANSYS

Como já mencionado anteriormente, utilizou-se o *Ansys Student* para a realização da simulação de um caso genérico de escoamento de ar sobre uma asa aerodinâmica. . Em particular, o *Ansys* tem um excelente *software* em termos de maneabilidade, com uma dinâmica bastante eficiente e alta variabilidade de aplicações em projetos de Engenharia. O *Fluid Flow (Fluent)* foi a extensão escolhida por ter uma abordagem mais completa que o *CFX*, que também é direcionada para essa finalidade.

O *software Fluent* contém os amplos recursos de modelagem física necessários para modelar fluxo, turbulência, transferência de calor e reações para aplicações industriais. Estes variam do fluxo de ar sobre a asa de um avião até a combustão em um forno, de colunas de bolha a plataformas de petróleo, do fluxo de sangue para a fabricação de semicondutores e do projeto de salas limpas para estações de tratamento de águas residuais. O *Fluent* abrange uma linha expansiva, incluindo modelos especiais, com capacidade para modelar sistemas de combustão interna, aeroacústica, turbomáquinas e multifásicos. (ANSYS, 2019)

3.3. ANÁLISES EXPERIMENTAIS EM TÚNEL DE VENTO

Um túnel de vento (Figura 3) é uma instalação destinada a produzir, de forma regular e controlada, uma corrente de ar com o objetivo de simular experimentalmente os efeitos causados sobre os corpos subsceros. Dentre os efeitos, destacam-se a mensuração de esforços característicos dos escoamentos aerodinâmicos como as forças de sustentação e arrasto e a visualização de vórtices. (FILHO, OLIVEIRA E PINHEIRO, 2017)



Figura 3: Ensaio em escala real em um túnel de vento

Fonte: <https://www.flatout.com.br>

Como ensaios em escala real, com construção de protótipos, tende a encarecer o custo de projeto, muitas organizações utilizam o recurso de impressão 3D para ensaiar os produtos em escala reduzida. A teoria de Análise Dimensional e Semelhança permite esse tipo de simplificação. Isto também é uma tendência nas ditas empresas do futuro, nos mais variados setores. A Figura 4 mostra uma aplicação desse tipo de recurso para análises aerodinâmicas na indústria automotiva.



Figura 4: Impressão 3D em ensaios aerodinâmicos na indústria automotiva

Fonte: <https://www.autoentusiastas.com.br>

4. METODOLOGIA

Para que um modelo matemático, seja ele desenvolvido por métodos analíticos ou numéricos, seja validado é preciso que o mesmo seja comparado com um conjunto de dados de resposta confiáveis, ou seja, que estejam muito próximo com o que de fato acontece na realidade. Ensaios experimentais são grandemente utilizados para esta finalidade, porém exige que o pesquisador tenha bom grau de sensibilidade e uma certa experiência para julgar os resultados obtidos. A Figura 5 retrata o passo a passo seguido para validação da simulação.

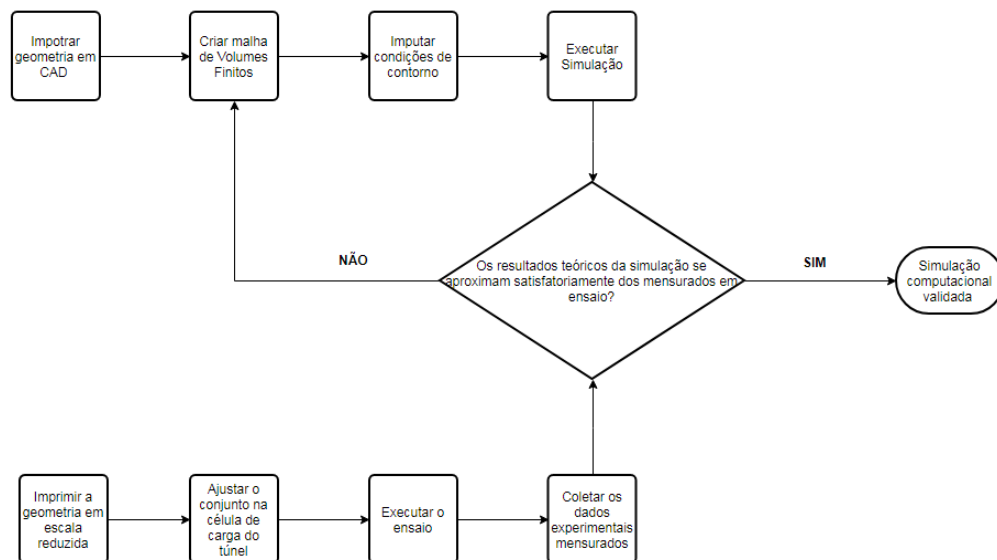


Figura 5: Fluxograma para a validação da simulação

Fonte: O próprio autor

4.1. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

No trabalho descrito nesse artigo, foi explorado o campo da Dinâmica de Fluidos aplicada a uma análise aerodinâmica de uma asa. Utilizou-se a versão estudantil do Ansys, mais especificamente na extensão Fluid Flow – Fluent.

4.1.1. IMPORTAÇÃO E EDIÇÃO DE GEOMETRIA

A geometria da asa foi criada no *software* Catia V5 e posteriormente importada no formato IGES. O *Design Modeler* e o *Spaceclaim* são extensões do Ansys disponíveis para preparação da geometria para a simulação. Dependendo da ferramenta de CAD e da complexidade geométrica do componente a ser simulado, pode haver incompatibilidades quando realizada a transferência para o Ansys e precisam ser corrigidas em qualquer uma dessas duas opções. Como trata-se de um escoamento externo sob a superfície de um corpo é necessário limitar o ambiente de ensaio com a ferramenta *enclosure* no Design Modeler, como mostrado na Figura 6.

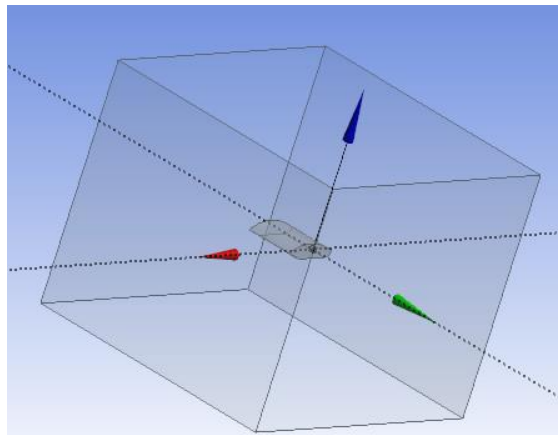


Figura 6: Definição do ambiente de simulação
Fonte: O próprio autor

4.1.2. GERAÇÃO DE MALHAS

A malha tetraédrica foi escolhida para a discretização dos sistemas de equações. Esse tipo de malha é uma boa opção para adaptação da geometria da asa em contato com o ar que escoar por suas superfícies. Quando gera-se uma malha automática na aba *Meshing*, nem sempre chega-se a uma boa resolução em termos de adaptação à geometria e precisão, porém há opções de edição desses aspectos. Dentre essas opções, as principais são: variar o tamanho máximo do volume finito, o seu tipo de geometria e alterar a relevância da malha. Para o caso de geometrias não muito complexas, como este, não utiliza-se muito esses recursos, mas é muito importante analisar graficamente a malha gerada e avaliar possibilidades de melhorias, isso interfere muito nas variáveis de saída. Observando as Figuras 7 e 8, em regiões de curvatura, onde a inserção do elemento triangular é mais complexa, é necessário o uso de elementos menores, adequando-os à geometria e, paralelamente, aumentando a precisão em termos de cálculo.

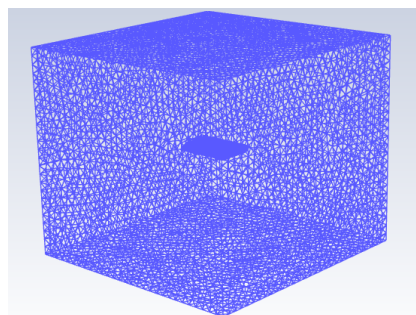


Figura 7: Vista em perspectiva da malha gerada no ambiente externo da geometria
Fonte: O próprio autor

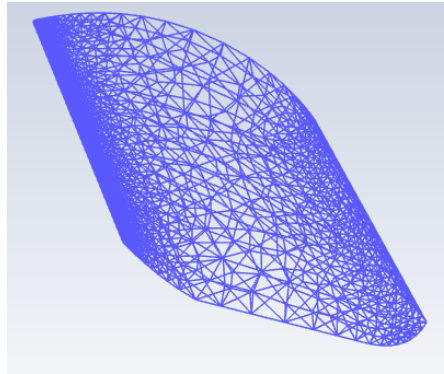


Figura 8: Detalhamento da malha na superfície da asa
Fonte: O próprio autor

4.1.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

No processo de preparação para a simulação, depois da confecção da malha é preciso definir as condições de contorno do modelo. Trata-se de imputar os valores das variáveis de entrada pré-definidas para alcançar os resultados de saída. Primeiramente é preciso definir a a proporcionalidade entre as variáveis do modelo teórico e do modelo experimental, baseando-se na Análise Dimensional e Semelhança. Por definição, quando compara-se escoamentos em dois modelos com escalas diferentes, eles possuem similaridade no escoamento se o número de Reynolds for o mesmo para ambos. De posse disso, é preciso buscar a igualdade perante a capacidade do túnel e as possibilidades de manipulação. O modelo real simulado computacionalmente tem dimensões três vezes comparado ao modelo que será impresso em escala reduzida. A capacidade de velocidade de escoamento e a capacidade de pressão absoluta do túnel é de, respectivamente, 25m/s e 5atm. Portanto, considerando a lei dos gases ideais, pode-se variar a densidade ao passo que varia-se a pressão ou a temperatura:

$$Re|_{real} = Re|_{reduzida} \tag{7}$$

$$\frac{\rho v L}{\mu}|_{real} = \frac{\rho v L}{\mu}|_{reduzida} \tag{8}$$

$$PV = mRT \quad \therefore \quad R = \frac{P}{\rho T}|_{real} = \frac{P}{\rho T}|_{reduzida} \tag{9}$$

$$T_{real} = T_{reduzida} \quad \therefore \quad 5P_{real} = P_{reduzida} \tag{10}$$

$$5\rho_{real} = \rho_{reduzida} \quad \therefore \quad \frac{1}{3}L_{real} = L_{reduzida} \quad \therefore \quad \frac{3}{5}v_{real} = v_{reduzida} \tag{11}$$

4.2. ENSAIO NO TÚNEL DE VENTO

A fim de validar a solução computacionalmente alcançada, a geometria da asa será impressa em três dimensões na escala de 1:3 e submetida a um escoamento controlado em um túnel de

vento. Para manter o mesmo número de Reynolds as variáveis do modelo real imputadas computacionalmente e as variáveis do modelo em escala reduzida deverão ter a intensidade conforme Tabela 1. O túnel de vento didático disponibilizado pela instituição está de acordo a Figura 9.

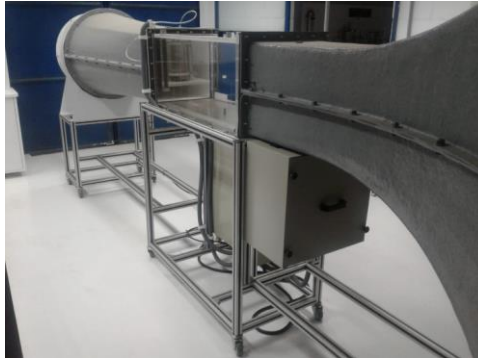


Figura 9: Túnel de vento didático
 Fonte: O próprio autor

	Escala Real	Escala Reduzida
Pressão (Kpa)	101,325	506,625
Velocidade (m/s)	42	25
Temperatura (K)	293	293

Tabela 1: Tabela com a intensidade das variáveis nas escalas real e reduzida
 Fonte: O próprio autor

5. ANÁLISES DE RESULTADOS E PROPOSTAS FUTURAS

5.1. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E COMPARATIVO COM EXPERIMENTAL

Antes de iniciar qualquer simulação numérica, é preciso definir o número de iterações e o critério de parada, ou seja, a convergência do modelo. Certamente, como aprende-se em cálculo numérico, quanto menor o índice de erro, maior o grau de proximidade de uma solução exata. Mas deve-se alertar para não definir exageradamente esse critério, o que compromete diretamente os resultados de saída. Essa sensibilidade é adquirida com experiência ao longo do tempo, à medida que aumenta a diversidade de modelos que se cria e simula. O gráfico de resíduos definidos para a simulação em questão condiz com a Figura 10.

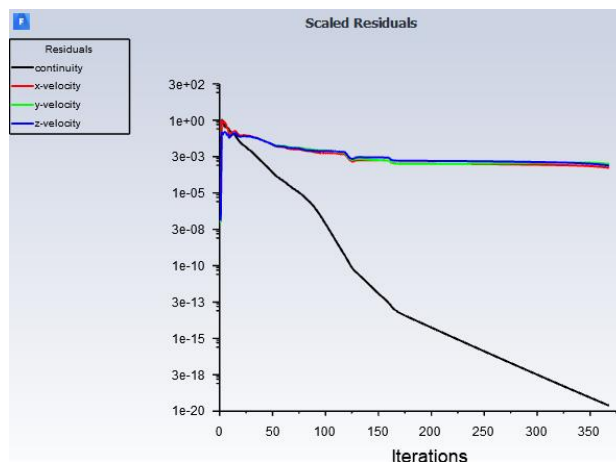


Figura 10: Gráfico de resíduos numéricos
 Fonte: O próprio autor

Em virtude da análise gráfica de velocidades na Figura 11, com base na visualização dos sentidos dos vetores e na intensidade indicada na legenda de cores, pode-se afirmar que os resultados não se distanciam do que se esperava para esse caso, em alguns aspectos. O sentido dos vetores ao contrário do movimento da asa e a intensidade da velocidade tem o valor próximo a 40m/s em zonas mais externas à camada da superfície da asa. Porém esperava-se que houvesse valores menores nas regiões de contato, pois as partículas entram em atrito com a superfície gerando essa redução. Na Figura 12, os parâmetros para aceitação ficam mais complicados em termos de intensidade de pressão absoluta, essa que proporcionam esforços de arrasto e sustentação na asa. Faz sentido as partículas de contato com a superfície terem uma intensidade maior de pressão, obviamente pelo atrito com o corpo, mas é insuficiente para considerar uma verdade. Por isso é necessário parâmetro experimental para comparar valores de esforços verificar se há coerência de resultados.

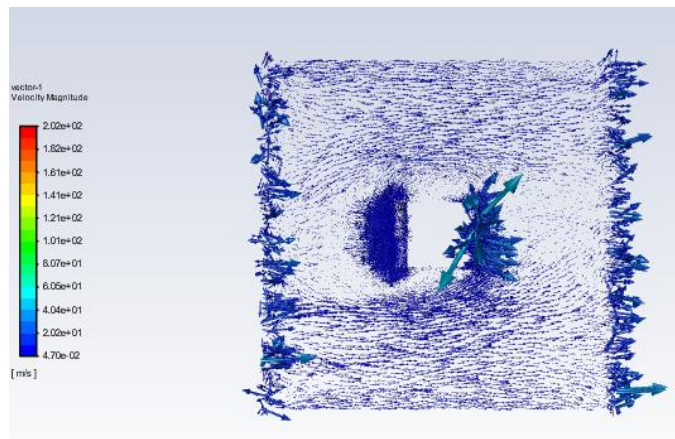


Figura 11: Diagrama de vetores de velocidade
 Fonte: O próprio autor

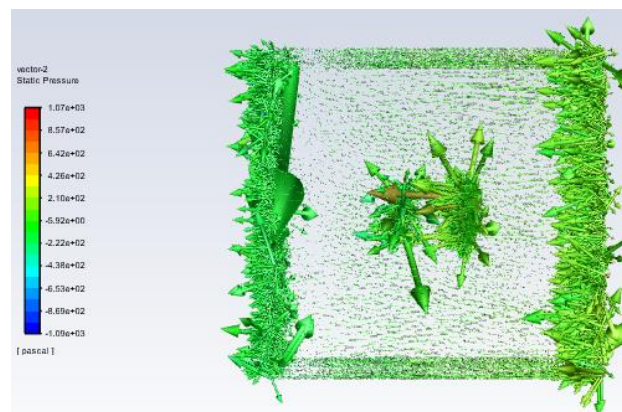


Figura 12: Diagrama de vetores pressão estática
 Fonte: O próprio autor

Por questões de incompatibilidade do tipo de filamento e outros fatores relacionados à impressão 3D, a asa ainda não pode ser impressa para o ensaio. Observando a Figura 13, a estrutura da mesma está se rompendo antes de alcançar a metade da geometria, porém verificam-se alternativas para alcançar sucesso e, conseqüentemente, realizar o ensaio no túnel.

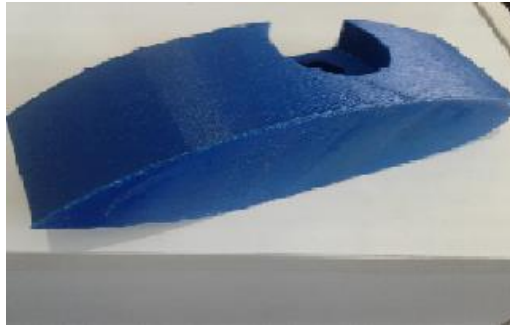


Figura 13: Impressão 3D da asa
Fonte: O próprio autor

5.2. PROPOSTA DE MELHORIA NO ENSINO

A proposta de método de ensino se baseia em Metodologias Ativas, a principal proposta de modelo de aprendizagem para atender as necessidades da indústria do futuro. A princípio, é necessário a contribuição de colaboradores, geralmente engenheiros e projetistas, de empresas parceiras interessados a orientar alunos em seus projetos, compartilhando as experiências relacionadas a projetos vividas na prática durante toda a carreira.

Os alunos do curso de Engenharia Mecânica em suas disciplinas de projeto presentes na grade, Mecânica Técnica (4º ano) e Construção de Máquinas e Equipamentos Mecânicos (5º ano) escolherão um produto a ser desenvolvido desde o 4º ano, onde somente será realizado todo o planejamento em termos de normas relacionadas e como seria realizado o desenvolvimento a partir do 5º ano, confeccionado um cronograma para controle. A disciplina de Projetos Mecânicos Assistidos por Computador, que atualmente é lecionada no 4º ano, dará suporte em termos de ferramentas computacionais. Sugere-se que a ferramenta Ansys na versão estudantil seja mais abordada em suas extensões mais comuns, como *Static Structural*, *Transient Structural*, *Fluid Flow (Fluent)* e *Turbomachinery Fluid Flow*, que certamente serão utilizadas no desenvolvimento do projeto, além de questões de importação de geometria de *Softwares de CAD*.

A partir do 5º ano, onde espera-se que o aluno terá um certo domínio ferramental e a sugestão cronograma de desenvolvimento em mãos, essa proposta seria apresentada ao colaborador voluntário para efetuar os ajustes iniciais e prosseguir com a orientação ao longo do ano, desenvolvendo os cálculos e simulações desse produto, definindo todo o dimensionamento do mesmo. Contudo, também existiria um orientador no corpo docente para opinar questões técnicas e orientar questões estruturais do trabalho de conclusão. Importante ressaltar que todo o sigilo e a privacidade da empresa deverá ser mantido em toda a transição de informações entre o aluno e o colaborador.

Portanto, o aluno terá que saber quais são as suas necessidades e buscar a orientação para que o seu projeto seja concluído com êxito. Essa ideia condiz totalmente com a Metodologia Ativa, onde o aluno é o principal agente no processo de aprendizagem ao invés do professor ou orientador. A promessa é de benefício para todos os envolvidos:

- Aluno: Além de ser mais autodidata em termos de estudos e trabalho, poderá ter mais chances de atuar futuramente na empresa parceira, além de estar mais preparado para a indústria do futuro (Indústria 4.0).
- Universidade: Terá uma imagem mais positiva na sociedade, proporcionando uma formação diferenciada para os profissionais que está inserindo no mercado.

- Empresa Parceira: Em caso de futura contratação do aluno orientado, terá uma mão de obra mais qualificada, além de ser bem vista no mercado e na sociedade participando desse processo integrador.

6. CONCLUSÃO

Diante do que foi mencionado ao longo do artigo, pode-se observar que os objetivos listados foram alcançados parcialmente. Conseguiu-se obter o entendimento prévio dos fundamentos da análise numérica de escoamentos, mais precisamente voltado para aerodinâmica bem como o alto grau de confiabilidade e precisão que o mesmo proporciona aos projetos, reduzindo drasticamente a necessidade de criação de protótipos e conseqüentemente o custo de projetos.

Independente da área de aplicação, é indispensável um aprofundamento nos conceitos teóricos que envolvem toda a simulação que se deseja realizar, desde os dados de entrada nas condições de contorno, na preparo e discretização das malhas e na interpretação dos resultados alcançados.

Acima de tudo, foi uma ocasião oportuna de propor mudanças no curso, buscando uma melhor formação para os engenheiros mecânicos graduados pela instituição e uma preparação diferenciada para a tendência de modelo industrial, onde a atuação desse profissional será indispensável.

7. REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J.; Computation Fluid Dynamics: The Basic with Applications , McGraw-Hill, 1ª edição, 1995.
- CASTELAN, J., MILANEZ, A., FRITZEN, D., Aprendizagem em Engenharia utilizando Métodos Analíticos e Numéricos. Faculdade SATC, Criciúma, 2017.
- FILHO, A., M., P. OLIVEIRA, S., T. PINHEIRO, M., E. Projeto de um túnel de vento do tipo sugador para ensaios didáticos. 2017. I Mostra científica de Engenharia Mecânica da Universidade Pitágoras - Universidade Pitágoras, São Luís, 2017.
- FOX, W., R.; MC DONALD, T.; A.; Introdução à Mecânica dos Fluidos. 8ª edição. LTC, 2014.
- GAMBOA, L., J., F. Análise Numérica das Características Aerodinâmicas de uma Vela Rígida Aplicando Dinâmica dos Fluidos Computacional. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Arquitetura Naval) - Universidade Tecnológica do Porto, Porto, Portugal, 2014.
- <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>. Acesso em 01/06/2019.
- <https://www.autoentusiastas.com.br/2016/03/tunel-vento-para-design/>. Acesso em 01/06/2019.
- <https://www.flatout.com.br/como-funciona-um-tunel-de-vento/>. Acesso em 01/06/2019.
- KOCH, A., R.; ZAPAROLI, L., E. Análise Numérica da Aerodinâmica dos Componentes de um VANT. Trabalho de Graduação. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 2010.



MOREIRA, A., M. Modelos científicos, modelos mentais, modelagem computacional e modelagem matemática: aspectos epistemológicos e implicações para o ensino. 2013. Tese (Doutorado em Ensino de Ciência e Tecnologia) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2013.

OSSES, J. O Método dos Volumes Finitos. *Engineering Simulation and Scientific Software*, 2016.

SILVA, R. Método numérico, analítico e experimental: Concorrentes ou complementares na Engenharia?. *Engineering Simulation and Scientific Software*, 2017.

SOFTWARE, S., S., E.; Qual a importância do engenheiro na simulação computacional?. *Engineering Simulation and Scientific Software*, 2016.

WHITE, M., F. Mecânica dos Fluidos. 8ª edição. McGraw-Hill, 2018.