

Análise Comparativa das Forças de Sustentação em uma Asa Obtidas por Método Analítico e Numérico (CFD)

José Filipe Trilha de Carvalho (jftcarvalho@ucs.br)

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul

Vagner Grison (vgrison2@ucs.br)

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul/CARVI

Sérgio Kucera (sskucera@ucs.br)

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Caxias do Sul

Resumo: As metodologias adotadas pelas equipes participantes da competição de Aerodesign para realizar o dimensionamento da asa de seus aeromodelos, devem garantir excelentes estimativas de valores de carga paga para cumprir os objetivos do projeto. A introdução dos métodos numéricos auxilia no projeto e no dimensionamento de todo o aeromodelo, principalmente quando bem relacionado com o objetivo principal do projeto. Isto pode ser observado neste estudo que se propõe especificamente a gerar análises comparativas da asa de um aeromodelo. No caso da competição, o objetivo é obter uma asa que apresente a maior sustentação e o menor arrasto possível. Para tal, a metodologia CFD (Computer Fluid Dynamics) é uma excelente ferramenta, pois ela possui a capacidade de realizar diversas análises em projetos distintos. Tem assim, a capacidade de apresentar vários resultados, tais como, o escoamento do fluido ao longo da asa, os vórtices de ponta de asa, a distribuição da pressão ao longo da área da asa, bem como valores de força de sustentação e arrasto, podendo ainda extrair diversos gráficos de cada um deles. O presente trabalho visa analisar de forma numérica uma asa com perfil Epler 423 e área definida, para se obter os valores de forças de sustentação para cada inclinação. Inicialmente é aplicada a metodologia clássica analítica para obter-se os valores para cada inclinação seus respectivos resultados de sustentação. Por fim, os resultados desta metodologia, que normalmente é adotada no projeto de Aerodesign, são utilizados como referência e comparados aos resultados do perfil com as mesmas condições de contorno adotadas no método numérico, com a finalidade de verificar a convergência dos resultados e a eficiência do método numérico.

Palavras-Chaves: Asa, CFD, Análise, Força.

Abstract: The methodologies adopted by teams participating in the competition Aerodesign to perform the dimensioning of their wing model aircraft, must ensure excellent value estimates payload to meet the project objectives. The introduction of numerical methods assists in the design and sizing of all model aircraft, especially when well connected with the main objective of the project. This can be observed in this study that aims specifically to generate comparative analysis of the wing of a model airplane. In the case of competition, the goal is to get a wing that presents the greatest support and the lowest possible drag. To this end, the methodology CFD (Computer Fluid Dynamics) is an excellent tool because it has the ability to perform various analyses on different projects. Thus has the ability to display multiple results, such as the flow of fluid along the wing, the wing tip vortices, the pressure distribution along the wing area, as well as values of lift and drag, may also extract many graphs each. The present work analyses a wing with a 423 Epler profile and defined area, to give the values of lift forces. At end the profile with the same boundary conditions adopted in the numerical method will be assessed based on the classic methodology analytical, usually adopted in the design of Aerodesign, in order to check the convergence of the results.

Keywords: CFD, Force.

1. Introdução

As análises numéricas cada vez mais vêm ganhando espaço nas engenharias modernas, pois permitem aos projetistas analisar o funcionamento completo ou parcial de seus projetos, proporcionando menor número de protótipos e maior agilidade para realizar alterações tornando possível obter melhor performance no desenvolvimento de produtos. Neste trabalho, o CFD é empregado para comparar os resultados obtidos de forma numérica com os resultados de cálculos analíticos, e tem por objetivo validar a utilização do CFD para futuras análises com configurações distintas de asa, onde será possível variar os perfis analisados, bem como a geometria inteira de uma asa.

A metodologia proposta não é muito utilizada atualmente, devido à complexidade da aplicação de métodos numéricos, bem como, sua interpretação. Porém, a quantidade de resultados disponíveis em um software CFD, e as inúmeras possibilidades de variações, sejam elas, dimensionais, ou dos próprios parâmetros da condição de voo, permitem ao projetista tomar decisões com um maior embasamento técnico. As decisões baseadas na escolha de perfil e dimensional da asa que são necessários para a obtenção da capacidade plena de voo, se dão de forma muito mais objetiva e eficiente se um software CFD for utilizado como ferramenta de análise. Isto porque há a possibilidade de se modificar um número maior de variáveis de projeto e das condições de voo, aplicados de tal forma que resultam em

dados que permitem analisar como estas alterações influenciam no projeto como um todo.

2. Desenvolvimento

Inicia-se o presente trabalho com um estudo partindo do número de Reynolds. A equação que envolve a velocidade com a dimensão característica em função da viscosidade cinemática do fluido a determinada temperatura, foi amplamente utilizada para se obter a dimensão característica, que neste caso, corresponde à corda do Perfil Epler 423. A equação 1 abaixo foi utilizada para obter este valor [1]:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (1)$$

Onde:

Re = Número de Reynolds [adimensional];

V = Velocidade [m/s];

d = Dimensão característica [m];

ν = Viscosidade cinemática [m²/s];

Considerou-se um fluxo turbulento com as seguintes condições:

Re = 456 000;

V = 18 [m/s];

ν = 1,5 x 10⁻⁵ [m²/s];

Com estes dados, obteve-se a dimensão característica (Corda do Perfil Epler 423) de aproximadamente 380 mm. Abaixo, está apresentada uma ilustração da asa com as dimensões de corda do perfil e envergadura da asa calculada conforme a equação (1).

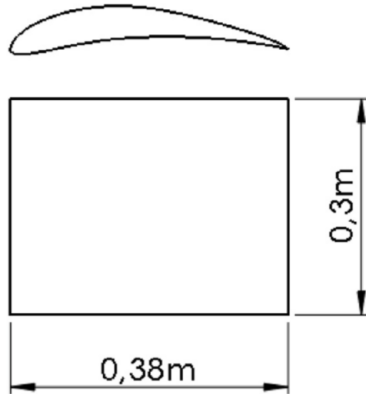


Figura 01: asa com perfil Epler 423.

Os valores calculados de força de sustentação para o perfil Epler 423 foram obtidos através da equação 2 a seguir:

$$L = C_L * q * S \quad (2)$$

Onde:

L = Força de Sustentação [N];

C_L = Coeficiente de Sustentação da asa finita [adimensional];

q = Pressão dinâmica [N/ m²];

S = Área da asa [m²];

Conforme Stinton (1983) sabe-se que:

$$q = \frac{1}{2} * \rho * V^2 \quad (3)$$

Substituindo (3) em (2) obtemos:

$$L = C_L * \frac{\rho}{2} * S * V^2 \quad (4)$$

Onde:

L = Força de Sustentação [N];

C_L = Coeficiente de Sustentação da asa finita [adimensional];

ρ = densidade [kg/ m³];

S = Área da asa [m²];

V = Velocidade [m/s];

Para a obtenção do valor do C_L da asa finita, foi utilizado o software XFOIL XFLR5 V6, com os parâmetros abaixo: Número de Reynolds: 456 000 [adimensional];

Densidade: 1,225 [kg/ m³];

Velocidade: 18 [m/s];

Viscosidade Cinemática: 1,5 x 10-5 [m²/s];

Tipo de análise: Invíscida;

Método de análise de asa: Painéis 3D

A tabela 01 apresenta os resultados obtidos de coeficiente de sustentação C_L para cada inclinação na asa finita, considerando os parâmetros de entrada citados acima:

Tabela 01: inclinação do perfil versus coeficiente de sustentação da asa finita para o perfil Epler 423 obtidos no XFLR 5.

Ângulo [°]	C_L
0	0,309
1	0,329
2	0,350
3	0,370
4	0,390
5	0,410
6	0,429
7	0,447
8	0,466
9	0,483
10	0,501

Utilizando os valores contidos na tabela 01 juntamente com a equação 2, foram obtidos os seguintes valores para a força de sustentação:

Tabela 02: inclinação do perfil versus força de sustentação.

Ângulo [°]	Força de sustentação [N]
0	6,862
1	7,445
2	7,908
3	8,227
4	8,812
5	9,101
6	9,524
7	9,939
8	10,345
9	10,740
10	11,125

Os valores acima serviram como referência para comparar e validar os resultados obtidos em simulações numéricas realizadas no software CFD Flow Simulation 2014, aplicando parâmetros idênticos, inclusive a inclinação do perfil.

3. Resultados e Análises

O software CFD Flow Simulation versão 2014 Service Pack 2.0, desenvolvido pela *Mentor Graphics*, presente dentro do *software* CAD 3D *SolidWorks* da empresa Dassault Systemes, foi utilizado para se obter valores de força de sustentação do perfil Epler 423. Tais análises, tiveram como variável apenas o ângulo de inclinação do perfil

utilizado na modelagem da asa tridimensional. Os demais parâmetros, tais como restrições e dados de entrada que serão apresentados a seguir, mantiveram-se constantes em todas as situações analisadas.

Abaixo, são apresentados os dados de entrada utilizados nos estudos:

Tipo de análise: externa;

Fluído: Ar;

Rugosidade superficial: desconsiderada;

Parede: Adiabática (sem troca de calor com o ambiente);

Temperatura: 20 [°C];

Densidade: 1,225 [kg/m³];

Velocidade = 18 [m/s];

Fluxo: Nessas análises, de modo geral o fluxo é turbulento.

Porém, como em algumas regiões do modelo o fluxo pode ser laminar, considerou-se um fluxo laminar e turbulento.

Regime Turbulento: o CFD Flow Simulation utiliza o modelo de equações K- ϵ .

Utilizou-se a metodologia de análise da convergência dos resultados, realizando-se pequenas modificações na malha de volumes finitos. Tais modificações, consistem em refinamentos locais da malha na geometria da asa, diminuindo o tamanho dos elementos de volume vizinhos à camada limite, bem como os elementos adjacentes às arestas do perfil aerodinâmico.

Neste mesmo sentido, realizou-se pequenas modificações na malha ao longo do volume de controle, refinando-se os elementos de volume mais afastados da geometria da Asa, a fim de garantir que os gradientes de pressão e a influência dos vórtices de ponta de asa fossem considerados na análise. Essa técnica aumenta consideravelmente o número de células presentes na análise, bem como a necessidade de possuir capacidade mais robusta para o processamento de informações, o que implica diretamente em recursos de memória RAM e capacidade de processamento disponíveis na máquina onde as simulações foram realizadas. Porém, esta ação é necessária e torna-se indispensável para uma boa utilização dos recursos disponíveis, bem como do tempo dispensado para executar cada análise. Não faria sentido algum utilizar uma malha extremamente refinada a fim de se obter maior precisão numérica, se o tempo necessário para rodar a análise fosse inviável, assim como, de nada adiantaria utilizar uma malha menos refinada e a precisão numérica apresentar uma variação muito grande.

Por estes motivos, justifica-se a importância de inicialmente realizar estes estudos para que viabilize a obtenção de uma malha que apresente resultados confiáveis.

A máquina utilizada para rodar estas análises dispõe de 32 GB de memória RAM, e processador Intel CORE I7 2,6GHz. Em resumo, pode-se descrever em poucos passos as etapas necessárias para a realização da análise CFD e obtenção dos resultados:

1) Modelagem da peça (modelo tridimensional da asa) com suas dimensões bem definidas;

2) Construção da análise, que consiste na inserção dos dados de entrada e condições de contorno do estudo a ser analisado.

3) Geração da malha do modelo tridimensional e do volume de controle. Nessa etapa, além de conhecer as características da geometria a ser analisada, torna-se necessário criar configurações de malha de modo que estas sejam capazes de representar matematicamente o mais próximo possível a geometria da asa. É importante salientar que a malha é a principal responsável pela precisão dos resultados numéricos, podendo estar diretamente relacionada com desvios observados em relação a resultados teóricos ou práticos.

4) Execução da análise. Nesta etapa, após conferir se todos os parâmetros foram inseridos de maneira correta, o *solver* do *software* desenvolve os cálculos para cada situação imposta.

5) Obtenção e interpretação dos resultados. Nesta etapa são extraídos gráficos de trajetória do fluido a fim de visualizar o escoamento ao longo do perfil, os vórtices de ponta de asa, gráfico da distribuição de pressão ao longo da asa, gráficos da força de sustentação. Estes resultados devem ser extraídos após a região transitória, ou seja, no momento em que a curva de convergência dos resultados não apresenta mais oscilações.

As figuras abaixo, ilustram os gráficos de convergência do resultado numérico de 0° a 5° obtido no *software* CFD para a força de sustentação, o restante das inclinações tem o mesmo comportamento.

Figura 02: Gráfico da força de sustentação da asa finita a 0°.

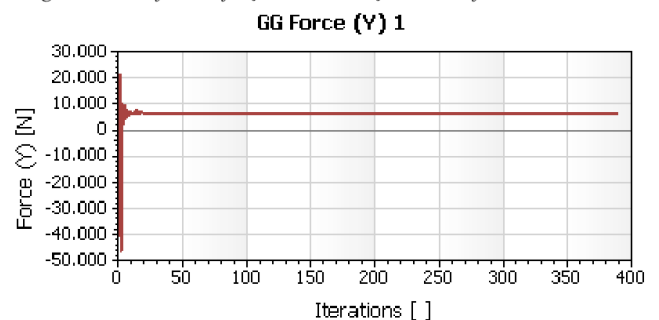


Figura 03: Gráfico da força de sustentação da asa finita a 1°.

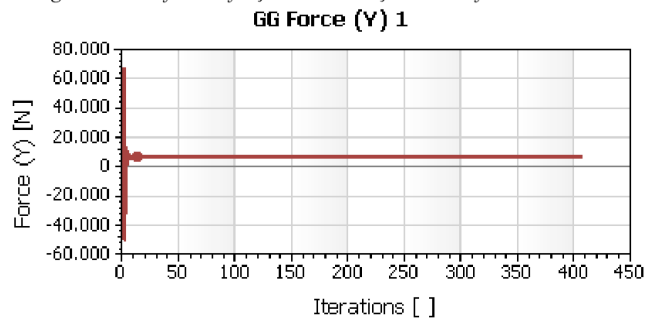


Figura 04: Gráfico da força de sustentação da asa finita a 2°.

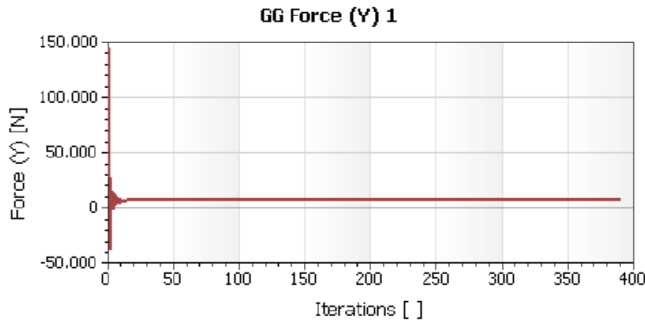


Figura 05: Gráfico da força de sustentação da asa finita a 3°.

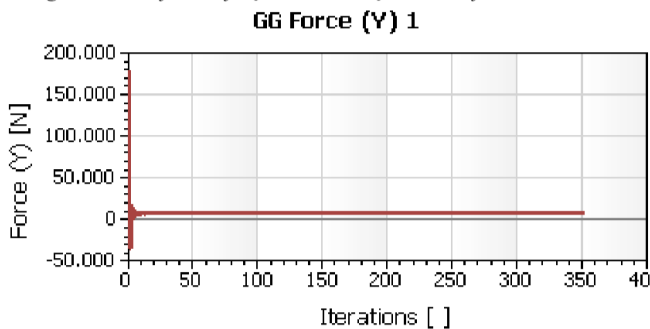


Figura 06: Gráfico da força de sustentação da asa finita a 4°.

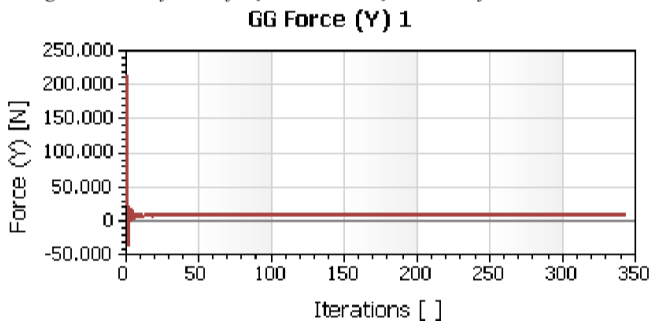
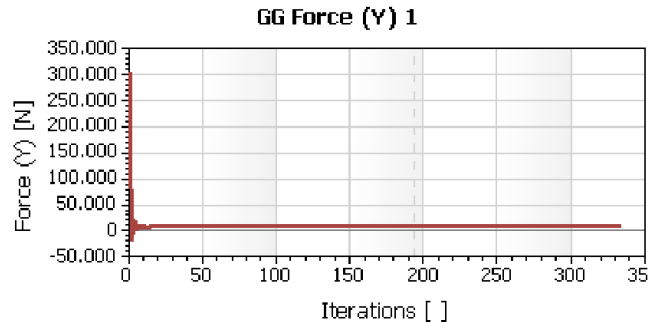
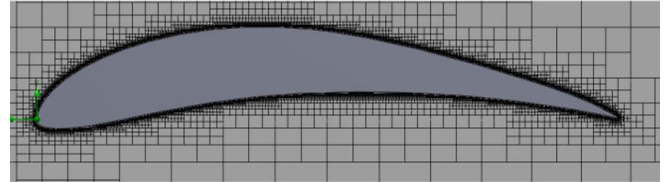


Figura 07: Gráfico da força de sustentação da asa finita a 5°.



A figura abaixo ilustra a malha inicial do modelo utilizado para as primeiras análises.

Figura 08: Malha inicial da Asa.



Conforme Maliska [2], “A solução numérica é convergente quando é estável e tende para a solução das equações diferenciais quando a malha é refinada”.

Após executar diversas análises com pequenas modificações nas configurações da malha, obteve-se uma configuração proposta como ideal, na qual acima dessa qualidade nos parâmetros de refinamento, os resultados numéricos tem variação desprezível (apenas cerca de 0, 2%). Além disso, os recursos computacionais para tais níveis de refinamento seriam cada vez mais altos, levando a um tempo de análise consideravelmente elevado.

A malha ilustrada abaixo possui aproximadamente 7.400.546 células, sendo 1.168.780 células parciais, 5.214.514 células de fluido e 1.017.252 células de sólido.

Figura 09: Vista Lateral - Malha final da asa a 0°.

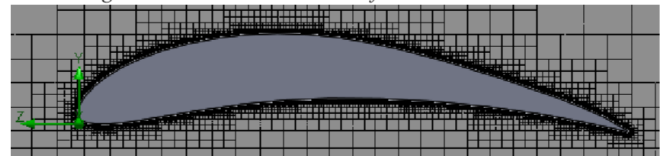
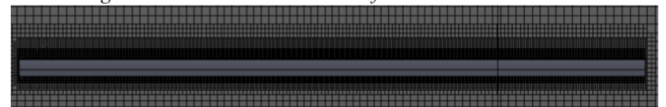


Figura 10: Vista Frontal - Malha final da asa a 0°.



Os resultados obtidos no software de volumes finitos (CFD) são apresentados na Tabela 03 onde é realizada uma comparação com os valores teóricos calculados anteriormente. A figura abaixo ilustra graficamente o comportamento das curvas da força de sustentação em função da inclinação do perfil.

Figura 12: Gráfico da inclinação x força teórica e numérica pelo CFD.

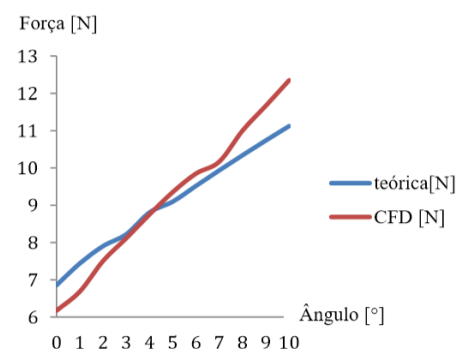


Tabela 03: força de sustentação teórica versus força de sustentação obtidos de forma numérica no CFD.

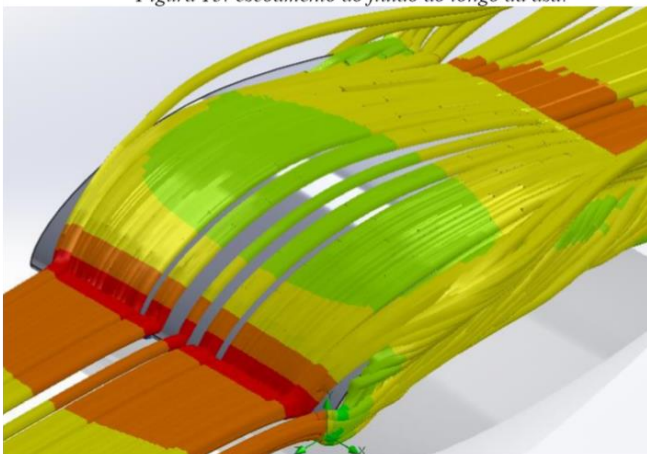
Ângulo [°]	Força de Sustentação teórica [N]	Força de Sustentação CFD [N]	Variação [%]
0	6,862	6,178	9,96
1	7,445	6,688	10,16
2	7,908	7,510	5,03
3	8,227	8,118	1,32
4	8,812	8,756	0,63
5	9,101	9,355	-2,79
6	9,524	9,851	-3,43
7	9,939	10,169	-2,31
8	10,345	11,002	-6,35
9	10,740	11,667	-8,63
10	11,125	12,349	-11

Utilizando-se dos resultados numéricos das forças obtidas no CFD, verifica-se que o método numérico apresenta valores que diferem dos resultados analíticos desde 0,64% até um valor máximo de aproximadamente 10% resultando numa variação média das 10 análises realizadas igual a 6,16%.

Cabe salientar que nenhum refinamento adicional foi realizado, ou seja, adotou-se um padrão inicial e as mesmas técnicas de refinamento foram utilizadas em todos os estudos.

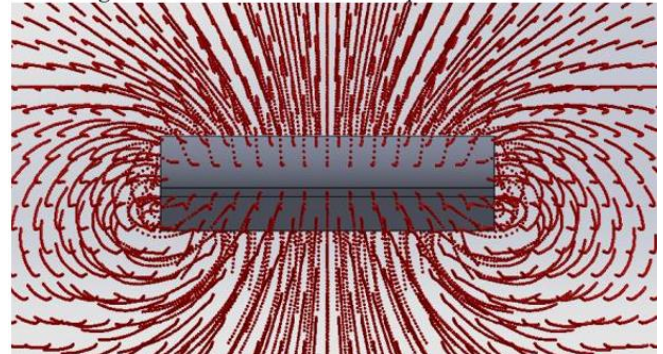
Na figura abaixo, é possível observar como se dá o escoamento do fluido ao longo da asa, e o comportamento dos vórtices de ponta de asa. Observa-se que o gradiente de pressão se dá de forma linear ao longo da superfície superior da asa, apresentando elevados valores nas extremidades, onde ocorre o impacto inicial do fluido com a parede e na região final onde os dois fluxos, superior e inferior se encontram.

Figura 13: escoamento do fluido ao longo da asa.



A figura 14 mostra como se criam os vórtices de ponta de asa.

Figura 14: esteira de vórtices de ponta de asa.



4. Conclusões

Este trabalho sugere que a metodologia convencional de cálculos utilizando como referência a análise e extração de coeficientes de perfis aerodinâmicos conhecidos por métodos de painéis 3D pode ser complementada, bem como, substituída pela metodologia de volumes finitos (CFD) proposta no presente trabalho.

Desta maneira, além dos resultados finais das forças de sustentação e arrasto a determinadas condições, o projetista pode complementar sua análise com uma visão mais ampla de seu projeto, com a possibilidade de controlar com um embasamento teórico os parâmetros, além de realizar modificações a fim de corrigir ou evitar problemas. Isso é possível, pois o *software* disponibiliza ao usuário diversos gráficos e resultados importantes que facilitam estas avaliações.

Estudos adicionais podem ser realizados a fim de se obter determinadas características para a asa, como a melhor relação de arrasto versus sustentação podendo ser obtida por meio das variações na inclinação do perfil da asa, ou ainda pequenas modificações no dimensional da asa, como corda e o alongamento.

Além disso, os ângulos abaixo de cerca de 4° resultam em valores maiores de sustentação obtidos pelo método analítico comparativamente ao método numérico. Acima deste valor de inclinação do perfil os resultados de sustentação se invertem. Este efeito deve ser melhor investigado por meio de novas análises com diferentes perfis e alongamentos de asa.

É interessante destacar que conforme os objetivos de cada estudo, o tempo de processamento é o ponto chave para se obter um equilíbrio em termos de comportamento de um determinado parâmetro em função das modificações pré-estabelecidas para o estudo, com isso, posterior a uma investigação inicial para selecionar a melhor combinação das variáveis pertinentes de alteração do projeto, é possível realizar uma análise com maior precisão.

O método de painéis 3D não foi analisado em detalhes. Foram utilizados estes dados como uma estimativa de valores a fim de serem comparados com os resultados obtidos na ferramenta numérica, a fim de comparar o

comportamento dos resultados utilizando os dois métodos. Com isso, pode-se constatar que ambos os métodos apontam valores semelhantes, e isto pode ser utilizado como argumento de validação da metodologia utilizada nas análises realizadas no *software CFD Flow Simulation*.

5. Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores, Vagner e Sérgio, pela ajuda e orientação ao longo de todas as atividades e por terem viabilizado este projeto.

6. Referências

STINTON, Darrol. The design of the airplane. Oxford BSP PROFESSIONAL BOOKS: London Edinburgh Boston, Melbourne Paris Berlin Vienna.1983. P.26.

MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. 2ª ed. (reimpressão): LTC Editora, 2010.

POTTER, M.C.; SCOTT, E.P. Ciências Térmicas - Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor. Thomson, 2007.

MUNSON, Bruce Roy; YOUNG, Donald F; OKIISHI, Theodore Hisao. Uma introdução concisa à mecânica dos fluidos. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.

ÇENGEL, Y.A, CIMBALA, JOHN M. Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações. Mc Graw-Hill, 2007.