

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DO ESCOAMENTO NA SEÇÃO DE TESTES DE UM TÚNEL DE VENTO EMPREGANDO A FERRAMENTA FLOW SIMULATION

**BITENCOURT, Vagner Fidelis ¹, FREZ, Gustavo Vieira ²,
FERREIRA, Jessica Guimarães Hiller ³**

Resumo

A análise do escoamento externo é muito útil no desenvolvimento de projetos de engenharia. Com a evolução computacional e o aperfeiçoamento dos softwares, a utilização da dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para estudos afins torna-se cada vez mais utilizada. Assim, neste trabalho utilizou-se a ferramenta Flow Simulation para simular e analisar o escoamento externo de ar sobre corpos de diversas geometrias, similar ao que ocorre na seção de testes de um túnel de vento. Obteve-se a espessura da camada-limite sobre uma placa-plana, bem como a força de arrasto para objetos de diferentes geometrias, os campos de velocidade e as forças de sustentação e arrasto para um aerofólio modelo Boeing 737 MIDSPAN. Considerou-se escoamento subsônico e incompressível e regimes laminar e/ou turbulento. A partir dos resultados, notou-se boa concordância com a equação de Blasius e a previsão da redução do arrasto com a carenagem dos corpos, além da visualização de regiões de formação de vórtices à jusante dos corpos e a relação da sustentação com o ângulo de ataque e o estol. Logo, a utilização dessa ferramenta é relevante, pois a mesma está inserida em um software muito utilizado em projetos de engenharia mecânica.

¹ Uniredentor, Graduando em Engenharia Mecânica, Itaperuna-RJ, e-mail: gigavag@hotmail.com

² Engenheiro Mecânico - UERJ, Pós-Graduação, PPG-EM / UNIFEL, e-mail: gustavofrez@gmail.com

³ Doutorado em Engenharia Mecânica, UFF, Rio de Janeiro-RJ, e-mail: prof.jessicahiller@gmail.com

Palavras-chave: Túnel de Vento; Simulação Computacional; escoamento Externo; Flow Simulation.

Abstract

External flow analysis is very useful in engineering design development. With the computational evolution and the improvement of the software, the use of computational fluid dynamics (CFD) for these studies is increasing. This work uses the Flow Simulation Tool to simulate and analyze the external airflow over bodies of different geometries, similar to what happens in the test section of a wind tunnel. The thickness of the boundary layer on a flat plate, the drag force for objects of different geometries, the velocity fields, and the lift and drag forces for a Boeing 737 MIDSPAN airfoil were obtained. Subsonic and incompressible flow and laminar and/or turbulent flow were considered. The results showed good agreement with the Blasius equation and predicted the reduction of drag force with body fairing. It was also possible to visualize the vortex formation regions and the lift relationship with the angle of attack, and the stall for the airfoil. Therefore, the use of this tool is relevant, as it is part of software widely used in mechanical engineering projects.

Keywords: Wind Tunnel; Computational Simulation; External Flow; Flow Simulation.

1 INTRODUÇÃO

A análise de fenômenos que envolvem escoamento externo ao redor de um corpo é de grande relevância no desenvolvimento de projetos de engenharia, pois permite minimizar gasto de combustível, promover melhorias no desempenho e evitar colapsos estruturais e/ou acidentados (ÇENGEL, 2007; BITENCOURT; FREZ; FERREIRA, 2021).

Segundo ÇENGEL (2007), há duas abordagens fundamentais na análise do escoamento de fluidos: a experimentação, que envolve a construção de modelos testados em túneis de vento ou em outras instalações, e o cálculo, que pode ser analítico ou computacional (envolve métodos numéricos).

Túneis de vento são utilizados para simular experimentalmente os efeitos do fluido (ar) sobre determinados objetos a fim de fornecer informações importantes para a solução de problemas aerodinâmicos. Um modelo simples e didático de túnel de vento é apresentado na

Figura 1 ele é do tipo circuito aberto e possui três partes básicas: seção convergente (onde há a admissão do fluido por um ventilador e sua aceleração), seção de testes (no qual é colocado o protótipo a ser analisado e há a visualização do escoamento, obtenção de medidas etc.) e seção divergente (em que o ar é desacelerado e descarregado).

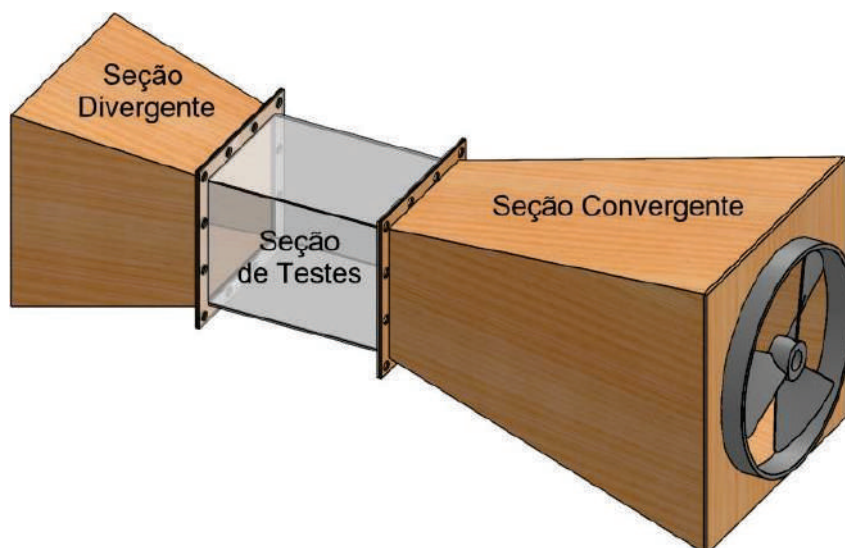


Figura 1 - Vista 3D do modelo de túnel de vento.

Fonte: Os autores (2021).

Na seção de testes analisa-se o escoamento ao redor de um objeto sólido, como a asa de um avião, visualiza-se a interação fluido-estrutura, obtém-se campos de velocidade e coeficientes de arrasto e sustentação. Informações relevantes no projeto de automóveis, aviões, navios, submarinos, edifícios etc., a fim de minimizar gastos de energia/combustível, redução de níveis de ruído e vibração, otimização de projetos etc. Sua aplicação também pode ser na área esportiva, a fim de simular condições às quais um atleta está submetido durante a prática de um esporte e adquirir informações para o desenvolvimento de equipamentos e roupas de alto desempenho, por exemplo.

Devido ao alto custo operacional, a maioria dos túneis de vento existentes em laboratórios, centros de pesquisas e universidades trabalham com modelos em escalas reduzidas (Barlow), de forma a utilizar os conceitos de similaridade geométrica, cinemática e dinâmica entre o modelo real e em escala reduzida (protótipo) para se obter os efeitos nos objetos em escala real.

Por outro lado, com o advento da computação e dos softwares de análise da dinâmica dos

fluidos computacional (CFD), como FLUENT, COMSOL, OpenFOAM, tem sido muito utilizado para analisar fenômenos desse tipo, empregando métodos computacionais para solução das equações que descrevem o movimento dos fluidos (equações de conservação de massa, de momentum, energia etc.). Alguns trabalhos que utilizaram a simulação computacional para analisar o escoamento externo em diversos corpos são: Teixeira; Gonçalves; Didier (2013), Fernandes Jr. et al. (2018), Seidel; Dos Santos; Lima (2020), Bitencourt; Frez; Ferreira (2021).

A análise do escoamento externo ao redor de aerofólios, que visa estudar a sua interação com o fluido é de suma importância pois permite analisar os campos de velocidade e de pressão, bem como as forças de arrasto e de sustentação (e, conseqüentemente, seus respectivos coeficientes) a fim de verificar regiões de formação de vórtices (NAKANO et al., 2007), níveis de vibração e ruídos, e condições de navegação segura (relacionado com o ângulo de ataque e a máxima sustentação). Dentre os diversos trabalhos presentes na literatura, os seguintes estudaram os efeitos da variação do ângulo de ataque em alguns aerofólios, utilizando CFD: Kandil e Elnady (2017) para o perfil GOE-387, Fonseca; Sousa Filho e Martins (2017) para os perfis NACA 0012 e EPPLER 423, Yilmaz et al. (2018) para os perfis NACA 0012 e NACA 4412, De Sá e Hallak (2020) para o perfil NACA 0012, Bitencourt; Frez e Ferreira (2021) para o perfil NACA 63-212.

Objetivando-se analisar fenômenos dessa natureza, este trabalho considerou a simulação computacional do escoamento externo, similar ao que ocorre na seção de testes de um túnel de vento, utilizando a ferramenta Flow Simulation. Foram consideradas diversas geometrias, desde uma placa plana a um perfil de aerofólio para obter campos de velocidade e forças/coeficientes de arrasto e sustentação, para o aerofólio.

2 METODOLOGIA

No estudo do escoamento de fluido, alguns conceitos são importantes na determinação do regime do escoamento, classificação relativa à velocidade do som. Além disso, no estudo da aerodinâmica, a definição das principais forças, arrasto e sustentação, é importante.

Nas simulações computacionais foram consideradas os regimes de escoamento laminar e turbulento. O regime laminar foi considerado a partir da definição teórica da velocidade à qual a seção de testes de um túnel de vento de pequeno porte estaria sujeita, considerando um ventilador

de parede como sistema de acionamento, sendo medida sua velocidade máxima com um anemômetro, como mostrado na Figura 2.

A velocidade de 2,71 m/s é a velocidade de entrada da seção convergente do túnel de vento. A velocidade na seção de testes, tomada como constante, é obtida da equação de conservação de massa. Considerando regime permanente, fluido incompressível e que há apenas uma entrada e uma saída, tem-se que

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = V \quad (1)$$

onde V é a vazão volumétrica do escoamento, v_1 e v_2 são, nessa ordem, as velocidades do ventilador e da entrada da seção de testes e A_1 e A_2 são as áreas do escoamento do ventilador e da entrada da seção de testes, respectivamente

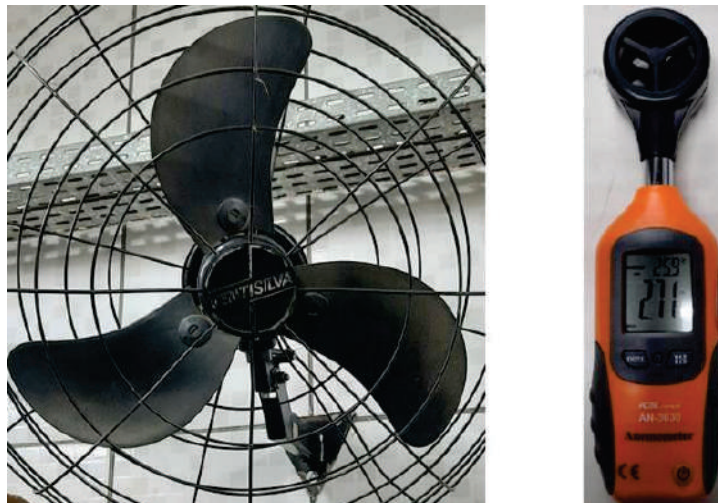


Figura 2 - Ventilador real e medição da sua velocidade máxima.
Fonte: Os autores (2021).

Como o número de Reynolds constitui a base da relação entre o comportamento de sistemas reais e de modelos físicos reduzidos, de forma a garantir as leis de similaridade e que os sistemas (modelo real e protótipo) sejam cinemática e dinamicamente semelhantes, deve-se ter para ambos o número de Reynolds, Re , que é um número adimensional que relaciona as forças de inércia e as forças viscosas de um determinado escoamento e está definido na Eq. (2).

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu} = \frac{v L_c}{\nu} \quad (2)$$

onde p é a massa específica do fluido, v é a velocidade do escoamento, L_c é comprimento característico do corpo por onde há o escoamento do fluido e μ e ν são, respectivamente, as viscosidades dinâmica e cinemática do fluido.

O comprimento característico, L_c , refere-se, em geral, a qualquer dimensão do sistema, como a corda da asa de um avião, o comprimento de um navio, a altura de um edifício e o diâmetro hidráulico de um tubo (MOREIRA JUNIOR; ANTUNIASSI, 2010).

Além disso, Re classifica o escoamento em laminar e/ou turbulento. A transição entre esses regimes depende da geometria e da rugosidade da superfície, da velocidade do escoamento, da temperatura da superfície e fluido (ÇENGEL, 2007), sendo neste trabalho considerada em $Re = 5 \cdot 10^5$.

Outro parâmetro adimensional de grande relevância nas análises de escoamentos externos e compressíveis é o número de Mach, M . Seu cálculo depende da velocidade do som que, por sua vez, depende do seu meio de propagação. Para o ar, tem-se que

$$M = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{kRT}} \quad (3)$$

onde v é a velocidade relativa ao escoamento do fluido, c é a velocidade do som, k é a razão entre os calores específicos, R é a constante do gás e T é a temperatura, em escala absoluta.

Para o ar, tem-se que $k = 1,4$ e $R = 286,8 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

De forma geral, tem-se que o escoamento será subsônico se $M < 1$, sônico se $M = 1$, supersônico se $M > 1$ e hipersônico se $M > 3$. Além disso, segundo FOX (2018), escoamentos de gases com transferência de calor desprezível também podem ser considerados incompressíveis, desde que as velocidades do escoamento sejam pequenas em relação à velocidade do som, de forma que se $M < 0,3$ então a aproximação para fluido incompressível é válida.

O escoamento de fluidos ao redor de corpos rígidos é responsável pela força de arrasto, que age sobre automóveis, aviões, linhas de transmissão de energia, árvores, canalizações de água submersas etc., e pela força de sustentação, desenvolvida pelas asas de um avião, carenagem de veículos, ascensão da chuva, partículas de pó em ventos fortes etc. mostrando assim sua importância em diversos projetos de engenharia, visando redução de combustível, por exemplo, e otimização de estruturas ÇENGEL(2007).

Os módulos das forças de arrasto, F_D , e de sustentação, F_L , calculadas, respectivamente, pelas Eqs. (4) e (5) dependem da velocidade relativa do fluido e do corpo, v , das propriedades geométricas do corpo (forma e tamanho) e das propriedades do fluido.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A_c v^2 \quad (4)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto e A_c é a área característica do corpo (que pode ser a área frontal, planificada ou molhada).

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho A_p v^2 \quad (5)$$

onde C_L é o coeficiente de sustentação e A_p é a área planificada do corpo.

A área planiforme, ou planificada, de um aerofólio depende do seu comprimento de corda e da sua envergadura e é calculada pela Eq. (6). Uma representação esquemática para um aerofólio modelo NACA 63-212 é apresentada na Figura 3, sendo calculada por:

$$A_p = c \cdot b \quad (6)$$

onde c é o comprimento de corda e b é a envergadura.

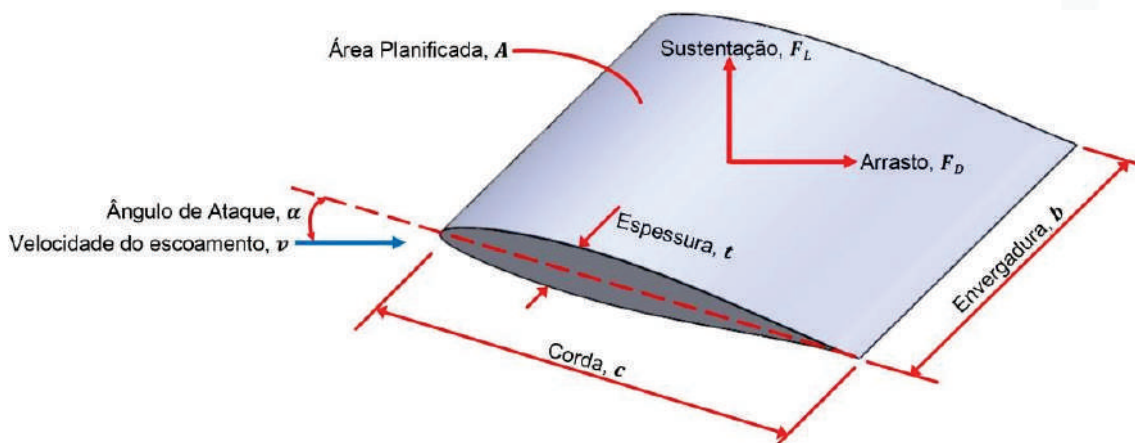


Figura 3 – Representação 3D de um aerofólio NACA 63-212 e suas características Fonte: Os autores (2021).

As simulações computacionais foram realizadas através da ferramenta Flow Simulation, que se baseia no método dos volumes finitos. Ela é um recurso CFD presente no software SolidWorks (muito utilizado na área de projetos de engenharia, especialmente mecânica)

integrando assim em uma mesma interface gráfica as tecnologias CAD, CAE e CFD. Pode-se simular e analisar problemas de escoamento interno e externo de fluidos (newtonianos e não newtonianos), bem como problemas que envolvam fenômenos de transferência de calor, dentre outros. Estão também disponíveis recursos avançados de malha geométrica, convergência de solução e determinação de regime de fluxo automática, sem sacrificar a facilidade de uso ou a precisão dos resultados obtidos (CADWorks, 2016).

As simulações realizadas foram conduzidas considerando o domínio computacional de medidas que representam a seção de testes de um modelo real de um mini túnel de vento didática, similar ao apresentado na Figura 1, cujas medidas são: $0 \leq x \leq 0,5 \text{ m}$; $0 \leq y \leq 0,35 \text{ m}$ e $0 \leq z \leq 0,35 \text{ m}$, sendo x a direção do escoamento. Para simplificação, considerou-se perfil de velocidade constante nesta seção. A Figura 4 ilustra esse domínio computacional, bem como a representação para a simulação do escoamento externo ao redor de uma esfera, utilizando uma malha computacional uniforme.

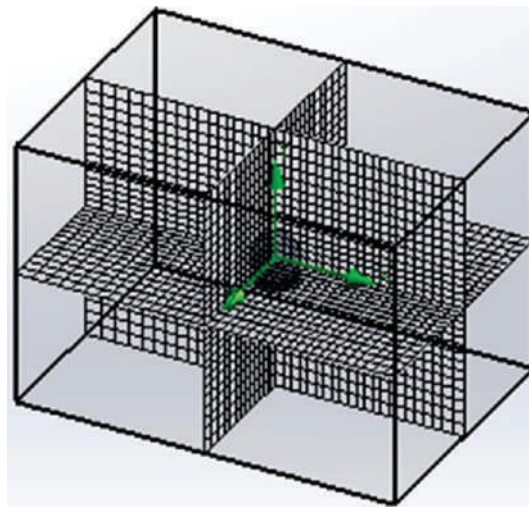


Figura 4 - Domínio computacional com malha estruturada.
Fonte: Os autores (2021).

3 RESULTADOS E ANÁLISES

Dado o diâmetro do ventilador, $D = 0,60 \text{ m}$, sua velocidade máxima medida (vide Figura 2), e sendo a seção de testes de seção transversal quadrada, de aresta $L = 0,35 \text{ m}$, pela Eq. (1) obteve-se a velocidade do ar na seção de testes: $v_{ST} = 6,255 \text{ m/s}$.

Considerando o ar a 20°C : $\rho = 1,204 \text{ kg/m}^3$ e $V = 1,516 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (ÇENGEL, 2007)

calculando o número de Mach pela Eq. (3) conclui-se que na seção de testes o escoamento é subsônico e, além disso, a hipótese de fluido incompressível pode ser considerada, haja visto que $M=0,018$.

3.1 Análise da camada-limite

Modelou-se uma placa plana com dimensões $150 \times 50 \times 5$ mm e simulou-se o escoamento de ar (laminar e turbulento, analisado na sua extremidade, $x = L$), bidimensional no plano x - y , utilizando uma malha cartesiana não estruturada com 245186 células de forma que a placa foi disposta no domínio computacional como se estivesse em contato com a parte inferior do túnel de vento.

Para obtenção do regime laminar considerou-se a velocidade real do ventilador, cuja velocidade na seção de testes foi obtida anteriormente e para o regime turbulento, considerou-se velocidade de corrente-livre igual a 150 m/s. Da Eq. (2) obteve-se os respectivos números de Reynolds: $Re_{lam} = 6,189 \cdot 10^4$ e $Re_{turb} = 1,484 \cdot 10^6$.

Na Figura (5) são apresentados os perfis de velocidade para ambos os regimes de escoamento, onde nota-se sua variação nas proximidades da interface fluido-estrutura (cor azul-escuro, região de desaceleração do fluido).

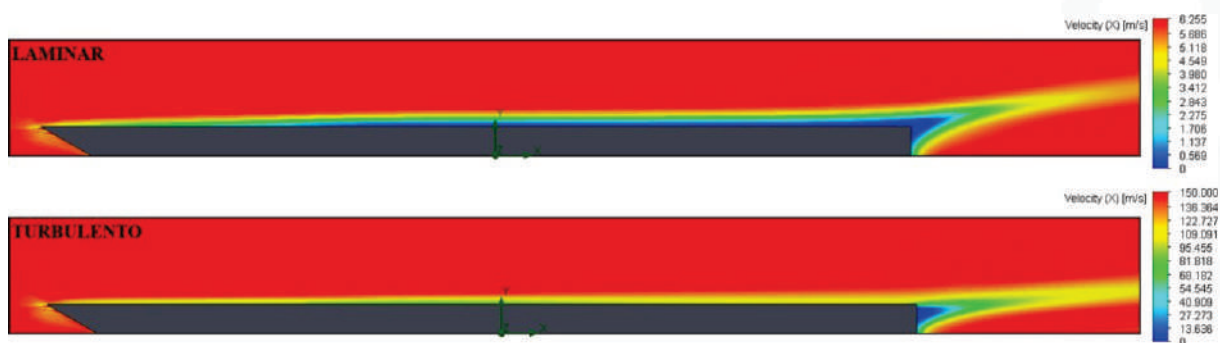


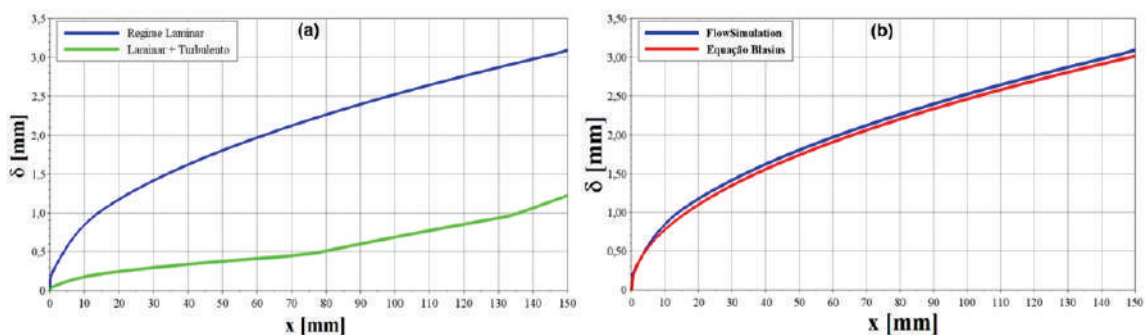
Figura 5 - Perfil de velocidade para os escoamentos laminar e turbulento sobre a placa plana.
Fonte: os Autores (2021).

Observando a Figura (5), nota-se que a espessura da camada-limite de velocidade (CLV), ou fluidodinâmica, reduz-se com o aumento da velocidade do ar. Assim, quanto mais turbulento é o escoamento, menor é a sua espessura, o que já era esperado a partir da teoria da camada-limite fluidodinâmica. Observa-se ainda que a espessura da CLV aumenta conforme avança-se à jusante da ponta da placa onde dá-se o primeiro contato do fluido com a placa. Essa análise torna-se mais

nítida na Figura (6), que representa graficamente a espessura da camada-limite *versus* o comprimento da placa, $\delta \times x$, onde pode-se notar na curva verde que o início da transição (mudança no perfil da curva de δ) entre os regimes laminar e turbulento ocorre sobre a placa plana e para $x \cong 79$ mm.

Na Figura (6-b), compara-se o resultado obtido através da simulação computacional com a equação de Blasius, Eq. (7), obtida a partir das equações diferenciais parciais que modelam o escoamento (Fox, 2018) no regime laminar. Nota-se que as curvas são similares, sendo o erro percentual médio entre os valores obtidos pela simulação computacional e a equação de Blasius, de aproximadamente 3,743%; mostrando boa concordância nos resultados obtidos pelo Flow Simulation para o escoamento laminar.

$$\delta = 5,0 \left(\frac{v}{V} x \right)^{0,5} \quad (7)$$



**Figura 6: Comparação da espessura da camada-limite fluidodinâmica obtidos no Flow Simulation, com o regime de escoamento (a) e com a teoria da equação de Blasius (b).
Fonte: Os Autores (2021).**

3.2 Análise do Arrasto

A partir da Eq. (4), sabe-se que a força de arrasto é dependente da área frontal de um corpo. No entanto, o formato desse corpo também influencia na redução, ou aumento, do arrasto sobre si. A fim de analisar essa influência, simulou-se diferentes perfis geométricos (apresentados na Figura 7), de mesma área frontal $A_f = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ e sujeitos às mesmas condições de escoamento, fluido à 20°C e velocidade de corrente livre igual a 200 m/s (resultando em um escoamento em regime laminar).

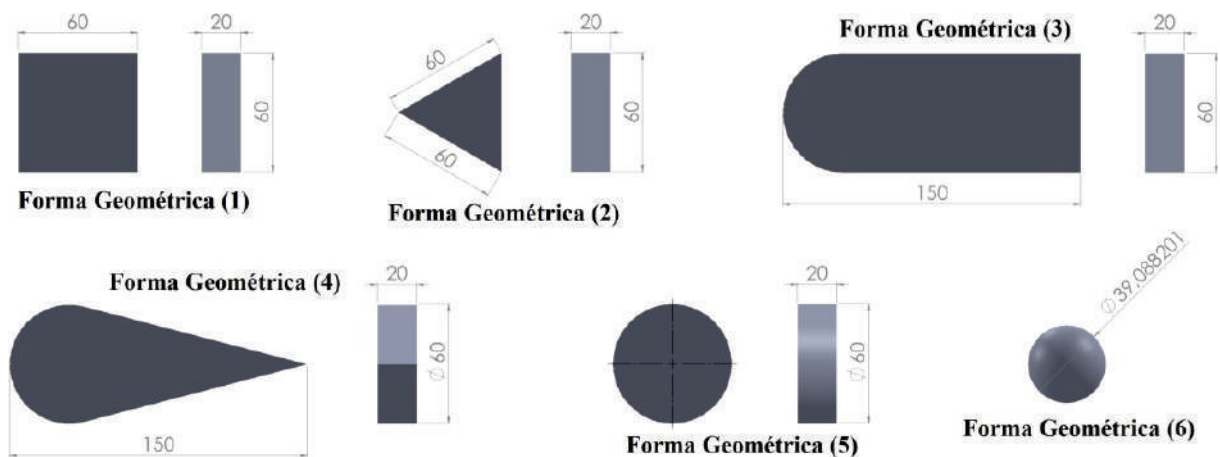


Figura 7: Formas geométricas utilizadas para análise através de simulação computacional da variação da força de arrasto em relação ao formato do corpo.

Fonte: Os Autores (2021).

As forças de arrasto, F_D , bem como o número de células das malhas computacionais utilizadas e o número de iterações para convergência dos resultados, em cada caso, são apresentadas na Tabela 1. O número de células que formam a malha computacional é obtido automaticamente, levando-se em consideração uma construção de malhas não uniformes, refinadas nas proximidades da superfície sólida, com fator de raio igual a 1,5 e nível de malha inicial igual a 3.

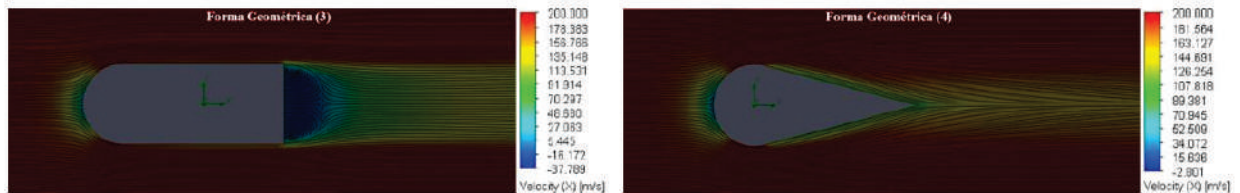
Tabela 1 - Forças de arrasto e dados de simulação para o escoamento externo sobre as formas geométricas apresentadas na Figura 7.

Forma Geométrica	F_D [N]	Nº Células	Nº Iterações
(1)	29,0268	116256	106
(2)	16,8713	114760	103
(3)	15,7962	142440	106
(4)	12,3412	140556	105
(5)	15,2715	121496	100
(6)	9,8757	27108	61

Dos resultados da Tabela 1, nota-se que para as formas geométricas (1) e (5) a força de arrasto reduz-se em aproximadamente 47,4%, enquanto que para os corpos (1) e (6), essa redução é de 66,0%, aproximadamente. Além disso, para os corpos (3) e (4), que representam o arredondamento do nariz (em ambos os corpos) e o carenamento agudo da parte traseira, para o

corpo (4), nota-se que essas modificações reduzem o arrasto do objeto em 45,6% e 57,5%, respectivamente para as formas (3) e (4). Esses resultados evidenciam a importância do carenamento de corpos para redução do arrasto e consequente redução de gastos com combustíveis e, também, melhorias no desempenho.

A Figura 8 apresenta as linhas de contorno para as formas geométricas (3) e (4), onde é possível notar que à jusante do corpo há redução das regiões de esteira, formação de vórtice e recirculação de fluido (em azul escuro, com velocidades negativas), o que reduz o arrasto de pressão ao qual o corpo está submetido. A velocidade de recirculação foi reduzida de -37,789 para -2,801 m/s ao se carenar de forma aguda totalmente seu comprimento, isso similarmente ocorre em aerofólios.



**Figura 8: Campos de velocidade para as formas geométricas (3) e (4).
Fonte: Os Autores (2021).**

3.3 Análise do Aerofólio BOEING 737 MIDSPAN

Considerou-se o aerofólio modelo Boeing 737 MIDSPAN, simulado ao nível do mar ($p = 101,325 \text{ kPa}$, $T = 25^\circ\text{C}$; $\rho = 1,23 \text{ kg/m}^3$), velocidade de corrente livre constante e igual a 69 m/s e diversos ângulos de ataque. Utilizou-se nas simulações uma malha retangular não uniforme, 2D em x (direção horizontal) e y (direção vertical), com razão de refinamento próxima ao aerofólio, como apresentado na Figura 9.

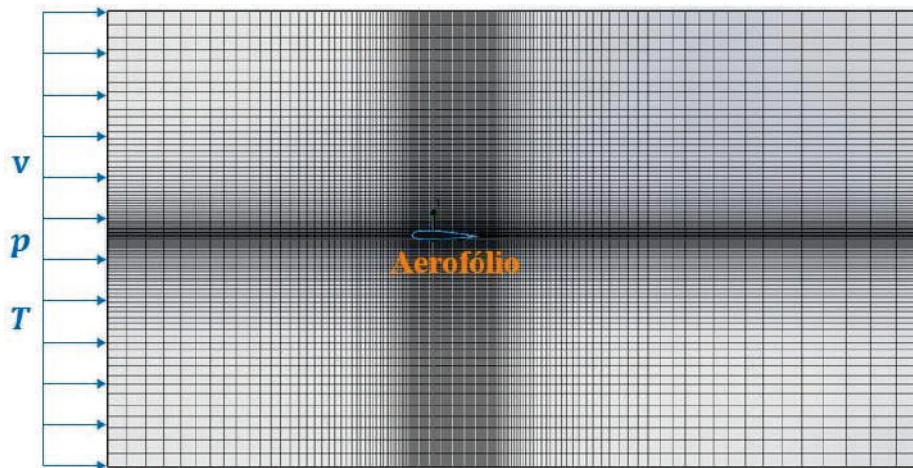


Figura 9: Malha empregada nas simulações e perfil de velocidade na entrada.
Fonte: Os Autores (2021).

Obteve-se os campos de velocidade e as forças de arrasto e sustentação, considerando variações de 1° em 1° para o ângulo de ataque. O comprimento de corda, a espessura e a envergadura considerados no modelo 3D simulado foram de 100 mm, 12,7 mm e 100 mm, respectivamente. A Figuras 10 apresenta os campos de velocidade na direção horizontal para seis ângulos de ataque.

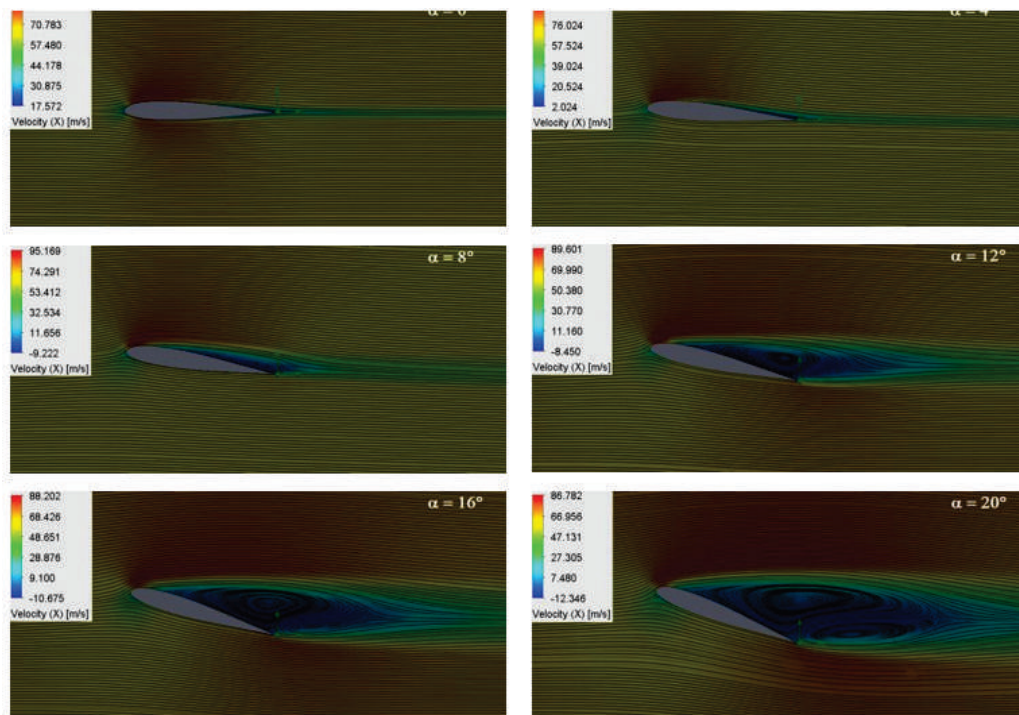


Figura 10: Campos de velocidade em função do ângulo de ataque do aerofólio.
Fonte: Os Autores (2021).

A partir da Figura 10, nota-se que o aumento do ângulo de ataque ocasionará aumento das regiões de baixa velocidade à jusante do aerofólio, gerando regiões de recirculação do fluido (regiões de velocidades negativas) e formação de vórtices, podendo gerar regiões de separação do escoamento e estolagem da aeronave, devido à redução da velocidade e, conseqüente, aumento da pressão na parte superior do aerofólio, gerando um gradiente de pressão adverso.

A análise da ocorrência do fenômeno de estol torna-se mais evidente ao se analisar a força de sustentação em função do ângulo de ataque. A Figura 11 apresenta a variação da força de sustentação, F_L , e de arrasto, F_D , em função do ângulo de ataque do aerofólio.

Da Figura 11, nota-se que tanto F_L quanto F_D tornam-se crescente com α . Todavia, a força de sustentação possui um valor máximo em seu domínio. Em condições seguras de voo, decolagem e pouso, o ponto de máxima sustentação limita a inclinação da aeronave, dado pelo seu ângulo de ataque, que deve ser sempre abaixo desse valor. De fato, em termos de $F_{L,máx}$ limita-se a velocidade mínima requerida para navegação a fim de se evitar a estolagem da aeronave e a ocorrência de acidentes, muitas vezes fatais. Pode-se notar ainda que nas regiões próximas à $F_{L,máx}$ a força de arrasto cresce mais ligeiramente, mostrando que para se reverter situações na estolagem, ou bem próximas, deve-se ter uma disponibilidade de energia muito grande, o que nem sempre pode ser suprido pelos motores da aeronave.

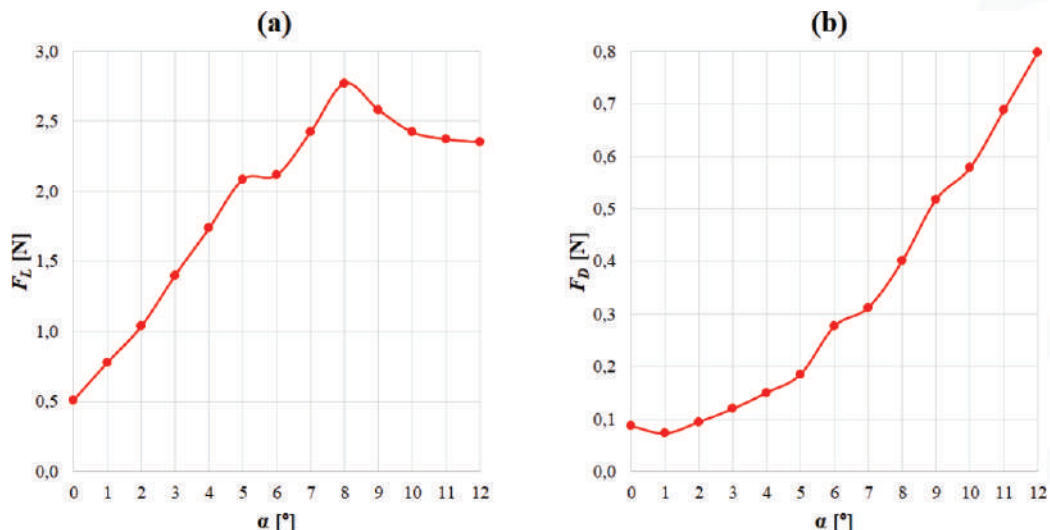


Figura 11: Variação das forças de sustentação (a) e arrasto (b) em função do ângulo de ataque. Fonte: Os Autores (2021).

4 CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou a ferramenta Flow Simulation para realizar simulações computacionais e estudar a dinâmica dos fluidos do escoamento de ar ao redor de corpos, similar ao que ocorre na seção de testes em túneis de vento. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que essa ferramenta descreve de forma satisfatória o escoamento externo sobre uma placa plana, sendo analisada a espessura da camada-limite fluidodinâmica e os perfis de velocidade.

Observou-se também a relação da força de arrasto com a forma geométrica do corpo sólido e a interação fluido-estrutura, tendo-se obtidos resultados condizentes com a teoria da mecânica dos fluidos, tendo a redução do arrasto com o carenamento do corpo, o que em aplicações de engenharia é de extrema relevância, pois contribui com a redução de gastos de combustíveis, de ruídos e de vibrações indesejados, por exemplo.

Além disso, da análise dos perfis de velocidade sobre um modelo de aerofólio sob diversos ângulo de ataque verificou-se regiões de formação de vórtices, de recirculação e separação do escoamento, e sua relação com a sustentação e o arrasto, concluindo que há limitações em relação à sustentação e o ângulo de ataque para se obter condições de voo seguras evitando a estolagem da aeronave e acidentes.

Por fim, conclui-se que a utilização dessa ferramenta presente em um software amplamente utilizado em projetos de engenharia mecânica é muito relevante, haja visto que dessa forma alia-se as tecnologias CAD, CAE e CFD.

5 REFERÊNCIAS

Barlow, J. B.; Rae Jr., W. H.; Pope, A. **Low speed wind tunnel testing**. 3rd. edition. New York: Wiley-Interscience, 1999.

Bitencourt, V. F.; Frez, G. V.; Ferreira, J. G. H. **Simulação computacional do escoamento externo empregando o Flow Simulation**. Workshop de Engenharia Mecânica - UFABC, 2021.

Bitencourt, V. F.; Frez, G. V.; Ferreira, J. G. H. **Simulação computacional do escoamento ao redor de um aerofólio NACA 63-212, utilizando a ferramenta flow simulation**. Encontro Regional de Matemática Aplicada e Computacional, ERMAC-RJ, 2021.

CADWorks. **SolidWorks flow Simulation: Descrição do produto**. Artigo de blog, 2016. Disponível em: <http://cadworks.com.br/produtos/solidworks-flow-simulation/>. Acesso em 30 de jun. de 2020.

Çengel, A. Y.; Cimbalaria, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. São Paulo: AMGH Editora, 2007.

De Sá, L. L.; Hallak, P. H. **CFD applied to the simulations of the angle of attack and flutter derivatives of an airfoil NACA0012**. Proceedings of the XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), ABMEC. Foz do Iguaçu/PR, Brazil, November 16-19, 2020.

Fernandes Júnior, J.; De Vasconcellos, G. L. F.; Maia, C. B.; Alves, W. A.; Cerqueira, V. L. **Numerical study of a flow around two circular cylinders in a wind tunnel**. 17th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering (ENCIT), November 25th-28th, 2018, Águas de Lindóia, SP, Brazil.

Fonseca, W. D. P.; Sousa Filho, L. M.; Martins, G. V. **Análise numérica do escoamento e dos coeficientes aerodinâmicos em aerofólios sem e com a utilização de flaps plain**. ACTA TECNOLÓGICA, v. 12, n. 1, 2017, pp. 45-62.

Fox, R. W.; McDonald, A. T.; Pritchard, P. J.; Mitchell, J. **Introdução à mecânica dos fluidos**, 9a. edição. São Paulo: Grupo GEN, 2018.

Kandil, M. A. F. Elnady, A. O. **Performance of GOE-387 Airfoil Using CFD**. International Journal of Aerospace Sciences, v. 5, n. 1, 2017, pp. 1-7.

Moreira Junior, O.; Antuniassi, U. R. **Construção e validação de um túnel de vento para ensaios de estimativa da deriva em pulverizações agrícolas**. Rev. Energia na Agricultura, Botucatu, vol. 25, n.3, 2010.

Nakano, T.; Fujisawa, N.; Oguma, Y.; Takagi, Y.; Lee, S. **Experimental study on flow and noise characteristics of NACA0018 airfoil**, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 95, pp. 511-531, 2007.

Seidel, M. B.; Dos Santos, G. J. B.; Lima, J. M. F. **Computational evaluation of wind loads on structures**. Proceedings of the XLI Ibero-Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE), ABMEC. Foz do Iguaçu/PR, Brazil, November 16-19, 2020.

Teixeira, P. R. F.; Gonçalves, R. A.; Didier, E. **Análise numérica da vibração induzida por vórtices a baixos números de Reynolds em um cilindro sob base elástica**. Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería, 25-28 junio 2013, Bilbao, España

White, F. M. **Mecânica dos fluidos**, 6a. edição. Porto Alegre: AMGH, 2011.

Yilmaz, M.; Koten, H.; Çetinkaya, E.; Coşar, Z. **A comparative CFD analysis of NACA0012 and NACA4412 airfoils**. Journal of Energy Systems, v. 2, n. 4, 2018, pp. 145-159.