

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Jhonny Gaspar de Moraes

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO ESCOAMENTO EM
ASA DE CAMINHÃO DE COPA TRUCK**

Joinville

2023

Jhonny Gaspar de Moraes

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO ESCOAMENTO EM
ASA DE CAMINHÃO DE COPA TRUCK**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Automotiva do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo

Joinville

2023

ESTUDO DO COMPORTAMENTO FLUIDODINÂMICO DO ESCOAMENTO EM ASA
DE CAMINHÃO DE COPA TRUCK

JHONNY GASPAR DE MORAES

Esta monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título do bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Joinville (SC), 08 de dezembro de 2023.

Banca examinadora:

Prof. Marcos Alves Rabelo, Dr. Eng.
Presidente/Orientador

Prof. Modesto Hurtado Ferrer, Dr. Eng.
Membro

Gabriel Zilio, M. Eng.
Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço a equipe R9 Competições e ao Renato Martins por permitir que fossem coletados todos os dados necessários para a realização deste trabalho.

RESUMO

À medida que a indústria automobilística se desenvolve e os veículos cada vez mais atingem os seus limites, aumenta a necessidade de se descobrir novas tecnologias e estudos mais aprofundados em aerodinâmica para a evolução do esporte de alta velocidade. Neste sentido, percebe-se uma crescente substituição do empirismo – entenda-se tentativa e erro – pelos métodos científicos. Este trabalho, portanto, traz contribuição neste cenário a partir da apresentação de um estudo sobre o escoamento em diferentes perfis superiores de asa de caminhões de corrida, utilizando análise de fluidodinâmica computacional (CFD) com o programa Fluent. O método CFD utilizado resolve as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS), em regime permanente. O modelo de turbulência SST $k-\omega$ foi utilizado, pois apresentou os melhores resultados, possui melhor acurácia para esta aplicação e se mostrou o mais indicado em termos das convergências. Na primeira etapa deste estudo, para efeito de verificação da convergência, foram testados diferentes tipos de malhas, com diferentes refinamentos, sendo a malha PoliHexcore apresentando os melhores resultados de convergência e de tempo computacional. Em uma primeira etapa, fora simulado um perfil cuja geometria corresponde a atualmente aplicada nos caminhões da Copa Truck. Em uma segunda etapa, uma geometria nova baseada em asa de carros da Formula 1 foi adaptado para o caminhão. Finalmente, na terceira e última etapa, fez-se a comparação e discussão dos resultados provenientes dos perfis estudados, tomando como base o coeficiente de arrasto (CD) e o coeficiente de sustentação (CL), o tamanho da camada limite e a vorticidade na esteira formada. Como conclusão geral, o leitor verificará a interessante relação entre os resultados cientificamente obtidos e sua possível vantagem na aplicação nas pistas.

Palavras-chave: Aerodinâmica. Aerofólio. CFD. Copa. Truck.

ABSTRACT

As the automobile industry develops and vehicles increasingly reach their limits, the need to discover new technologies and more in-depth studies in aerodynamics for the evolution of high speed sport increases. In this sense, we can see a growing replacement of empiricism, that is, trial and error, by scientific methods. This work, therefore, makes a contribution to this scenario by presenting a study on the flow in different racing trucks upper wing profiles, using computational fluid dynamics (CFD) analysis with the Fluent program. The CFD method used solves the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (RANS), in steady state. The SST $k-\omega$ turbulence model was used, as it presented the best results, has better accuracy for this application and proved to be the most suitable in terms of convergence. In the first stage of this study, for the purpose of verifying convergence, different types of meshes were tested, with different refinements, with the PolyHexcore mesh presenting the best convergence and computational time results. In a first stage, a profile was simulated whose geometry corresponds to that currently applied to Copa Truck trucks. In a second stage, a new geometry based on Formula 1 car wings was adapted for the truck. Finally, in the third and final stage, the results from the studied profiles were compared and discussed, based on the drag coefficient (CD) and the lift coefficient (CL), the size of the boundary layer and the vorticity in the wake formed. As a general conclusion, the reader will see the interesting relationship between the scientifically obtained results and their possible advantage in application on the tracks.

Keywords: Aerodynamics. Airfoil. CFD. Copa. Truck.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACES

ANSYS – Programa de simulações numéricas

CFD – Computational Fluid Dynamics

CTJ – Centro Tecnológico de Joinville

RANS – Reynolds-Averaged Navier-Stokes

RNG – Renormalization Group Theory

LISTA DE SÍMBOLOS

- AP – Área projetada [m^2]
 CD – Coeficiente de arrasto
 CL – Coeficiente de sustentação
 CP – Coeficiente de pressão
 ω – Taxa de dissipação turbulenta [$J/kg \cdot s$]
 FD – Força de arrasto [N]
 FL – Força de sustentação [N]
 G – Constante da gravidade [m/s^2]
 K – Energia cinética turbulenta [J/kg]
 L – Comprimento [m]
 m – Viscosidade dinâmica do fluido [m^2/s]
 mt – Viscosidade turbulenta [m^2/s]
 P – Pressão estática local [Pa]
 PF – Pressão do fluxo [Pa]
 PK – Produção turbulenta gerada pelas forças viscosas
 r – Densidade do fluido [kg/m^3]
 Re – Número Reynolds
 U – Velocidade na direção X [m/s]
 V – Velocidade [m/s]
 v – Velocidade na direção Y [m/s]
 w – Velocidade na direção Z [m/s]

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cisalhamento de elemento fluido.....	16
Figura 2 – Escoamento incompressível em torno de uma esfera	18
Figura 3 – Trajetória da partícula em escoamentos unidimensionais, laminar e turbulento	19
Figura 4 – Camada-limite sobre uma placa plana (espessura vertical ampliada).....	19
Figura 5 – Escoamento em camada-limite com gradiente de pressão.....	20
Figura 6 – Forças de arrasto viscoso e arrasto de pressão	22
Figura 7 – Forças de pressão e forças viscosas agindo em corpo bidimensional.....	23
Figura 8 – Distribuição de pressão em torno de veículo	24
Figura 9 - Forças e momentos agindo em um veículo.....	24
Figura 10 – Relação entre o grau de modelagem e o custo computacional dos modelos de turbulência	28
Figura 11 – Visão Geral da Solução Baseado em Densidade	30
Figura 12 - Visão Geral da Solução Baseado em Pressão.....	31
Figura 13 – Principais tipos de elementos de malha: (a) Hexagonal e (b) tetraédrico	36
Figura 14 – Impacto na solução com malha de (a) baixa qualidade e (b) boa qualidade.....	37
Figura 15 – Vetores empregados no cálculo da qualidade ortogonal na equação 20.....	38
Figura 16 – Medida da qualidade ortogonal da malha	38
Figura 17 – Caminhão Copa Truck da equipe R9 Competições	42
Figura 18 – Escaneamento da parte frontal inferior do caminhão.....	43
Figura 19 – Modelagem do caminhão	43
Figura 20 – Asa do caminhão	44
Figura 21 – Asa em vista de corte lateral	44
Figura 22 – Dimensões do domínio computacional.....	46
Figura 23 – Malha de superfície de menor refino de elementos poliédricos.....	47
Figura 24 – Qualidade dos elementos da malha	49
Figura 25 – Subdivisão da camada limite	49
Figura 26 – Relação de elementos e a resolução da camada limite	50
Figura 27 – Comparativo entre as malhas	51
Figura 28 – Comparativo entre as malhas de superfície.....	52
Figura 29 – Comparativo entre as soluções dos casos.....	56
Figura 30 – Comparação do YPlus linear e logaritmico com curva típica de resultado	58

Figura 31 – YPlus da malhas C e D.....	59
Figura 32 – Linhas de Corrente na Geometria de Referência	61
Figura 33 – Asa traseira de um fórmula 1 2019	62
Figura 34 – Modelo de asa traseira de um fórmula 1 2019	62
Figura 35 – Modelo otimizado proposto	63
Figura 36 – Modelo de asa com seção da cabine	64
Figura 37 – Linhas de corrente dos modelos com teto no plano de simetria	65
Figura 38 – Campo de velocidade no plano de simetria	66
Figura 39 – Campo de pressão no plano de simetria.....	66
Figura 40 – Intensidade de turbulência no plano de simetria	67
Figura 41 – Vista lateral do suporte da asa.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores relevantes para o dimensionamento da malha de superfície	47
Tabela 2 – Valores relevantes para geração das malhas no domínio	50
Tabela 3 – Valores relevantes para as condições de contorno	54
Tabela 4 – Valores dos controles de solução.....	55
Tabela 5 – Valores finais dos coeficientes	57
Tabela 6 – Comparativo dos coeficientes.....	63
Tabela 7 – Comparativo dos coeficientes utilizando teto na simulação.....	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	MECÂNICA DOS FLUIDOS.....	16
2.1.1	Número de Reynolds	18
2.1.2	Escoamento Laminar e Turbulento.....	18
2.1.3	Escoamento Compressível e Incompressível.....	19
2.1.4	Camada Limite	19
2.1.5	Equacionamento do movimento do fluido.....	20
2.1.6	Arrasto.....	21
2.1.7	Sustentação.....	22
2.2	AERODINÂMICA VEICULAR	23
2.2.1	Força de Arrasto.....	25
2.3	DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	26
2.3.1	Modelagem da Turbulência.....	27
2.3.2	Principais modelos de Turbulência.....	29
2.3.3	Teorias de Solução do Escoamento.....	29
2.3.3.1	Solução Baseada na Viscosidade	30
2.3.3.2	Solução Baseada na Pressão.....	31
2.3.3.3	Algoritmo Baseado em pressão SIMPLE.....	32
2.3.3.4	Algoritmo Baseado em pressão SIMPLEC	32
2.3.3.5	Algoritmo Baseado em pressão PISO	33
2.3.3.6	Algoritmo Baseado em pressão COUPLE	34
2.3.4	Malha Computacional.....	34

2.3.4.1	Tipos de Elementos	35
2.3.4.2	Qualidade dos Elementos	36
2.3.4.3	Convergência e Sensibilidade de Malha	38
2.3.5	Análise de Convergência.....	39
2.3.6	Parâmetro Y+	40
3	METODOLOGIA	41
3.1	MODELAGEM	41
3.1.1	Escaneamento 3D	41
3.1.2	Geometria do Modelo.....	44
3.2	ESTUDO DE MALHA	45
3.2.1	Domínio Computacional	45
3.2.2	Geração das malhas.....	46
3.2.3	Comparativo das Malhas	50
3.3	SOLUÇÃO PRELIMINAR.....	53
3.3.1	Modelo de Turbulência	53
3.3.2	Controles de Solução	54
3.3.3	Condições de Contorno	54
3.3.4	Controles de Solução	55
3.3.5	Resultados das Simulações	55
3.3.6	Comparação do YPlus.....	57
4	RESULTADOS	61
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Uma das ferramentas computacionais que nos permite um procedimento numérico visando a determinação de campos de forças, deslocamentos, deformações e temperaturas é conhecida como método dos elementos finitos. Este método nos possibilita discretizar um corpo contínuo, construindo um modelo com um número finito de elementos conhecidos e interconectados entre si. (RADE, 2011). Esta subdivisão é conhecida como malha de elementos finitos.

Esta transição de domínios, contínuo para o discreto, precisa ser sequenciada. É necessário estudar os efeitos dos esforços aplicados no modelo para que seja possível selecionar os elementos, fazendo com que a malha discretizada represente adequadamente o contínuo.

O método é aplicado cada vez mais em projetos de engenharia. Pois, apresenta resultados confiáveis, quando realizado uma modelagem coerente.

A discretização passa por determinadas etapas e primeiramente é modelado a geometria do problema real e em seguida são atribuídas as propriedades dos materiais envolvidos, quando necessário. Só então são aplicadas condições de contorno, esforços e escoamentos submetidos. A partir deste passo o modelo está pronto e pode apresentar resultados.

A maneira mais confiável de reproduzir uma análise adequada é através de testes em laboratório. Neste momento entra o procedimento numérico de elementos finitos, pois permite validar diferentes situações sem gastar demasiado tempo em procedimentos experimentais caros. (MAHEN, 2007)

Existem inúmeras variáveis a serem exploradas para apresentação de resultados coerentes, de modo a aumentar a certeza de resultados. Uma das maneiras mais relevantes de atuar no erro consiste no refinamento de malha, diminuindo o tamanho dos elementos, fazendo com que o modelo apresente um maior número de nós (conexões).

A relação custo benefício do método está diretamente ligada com o tamanho da malha. Um maior refinamento implica em um custo computacional mais elevado, maior tempo de processamento. É de responsabilidade do projetista decidir o quão preciso necessitam ser os resultados apresentados, para que seja possível a obtenção de um modelo satisfatório para determinada aplicação, visando a diminuição de custos.

Os fenômenos físicos reais são modelados em um programa de elementos finitos de acordo com sua representação dimensional e a qual tipo de esforço ou escoamento estará sujeito o modelo discreto.

A dinâmica dos fluidos computacional então é empregada e é um campo da ciência que estuda as leis físicas que governam o fluxo de fluidos sob várias condições.

Dinâmica dos Fluidos Computacional ou CFD, como é popularmente conhecido, é usado para gerar simulações de fluxo com o auxílio de computadores. CFD envolve a solução das leis que regem a dinâmica de fluidos numericamente. O complexo conjunto de equações diferenciais parciais é resolvido no domínio geométrico dividido em pequenos volumes, que são conhecidos como malha (ou grade).

A aerodinâmica veicular é responsável pela eficiência energética resultante do coeficiente de arrasto, aspectos de segurança como estabilidade do vento cruzado e sujidade do carro, e também da influência ambiental nos arredores do automóvel, incluindo a poluição do ar e o ruído (COGAN, 2016).

O uso de CFD para prever o escoamento aerodinâmico em torno de veículos teve aumento significativo devido ao avanço na computação, tornando-se uma ferramenta viável para simular os efeitos aerodinâmicos (NGUYEN, 2015).

Várias etapas devem ser seguidas quando se utiliza métodos computacionais para análises de fluidos, uma delas é a geração da malha. De acordo com Vergel (2013), a densidade da malha é um fator importante na simulação, já que está diretamente envolvida no custo computacional da solução e interfere nos resultados da solução.

Segundo Dhaubhadel (1996), a maioria dos escoamentos envolvendo movimento de ar são incompressíveis e turbulentos. Nesses casos, grande parte das simulações aerodinâmicas são realizadas utilizando modelos RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Os modelos mais utilizados são $\kappa - \epsilon$ e $\kappa - \omega$, pois quando comparados a outros modelos oferecem resultados satisfatórios e não demandam um alto custo computacional.

Este trabalho consiste na utilização do programa ANSYS FLUENT para realizar uma análise aerodinâmica para a geometria proposta pelo autor. Nos capítulos 2, 3 e 4 serão abordados assuntos relacionados a mecânica dos fluidos, aerodinâmica e CFD. Os capítulos seguintes apresentam a revisão bibliográfica, metodologia implementada no trabalho, seguido pelos resultados e discussões.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é analisar o comportamento fluidodinâmico do escoamento de ar em um modelo de asa utilizado em caminhão de corrida da Copa Truck, utilizando modelagem e simulação numérica com os programas Fusion 360 e Ansys.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Modelar o conjunto asa-suporte do caminhão;
- Estudar o efeito da malha na simulação;
- Estudar o comportamento do escoamento de ar em torno do objeto de estudo;
- Analisar a eficiência da asa em função dos coeficientes de arrasto e força;
- Propor otimizações angulares e/ou geométricas para asa;
- Analisar combinações de diferentes partes na formulação da asa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aerodinâmica causa grande impacto em veículos em termos de cargas, principalmente se o veículo for de competição. Forças aerodinâmicas interagem com o veículo causando arrasto, sustentação (positiva ou negativa), forças laterais, momentos em todos os sentidos que geram guinada, rolamento e arfagem bem como geram ruídos. Isto afeta a economia global de combustível do veículo, dirigibilidade e segurança. O arrasto no veículo se dá de duas formas: Arrasto de pressão e atrito viscoso. A mecânica do escoamento será detalhada a fim de entender os fenômenos que acontecem nos veículos e mensurar qualitativamente a influência da aerodinâmica no desempenho do veículo.

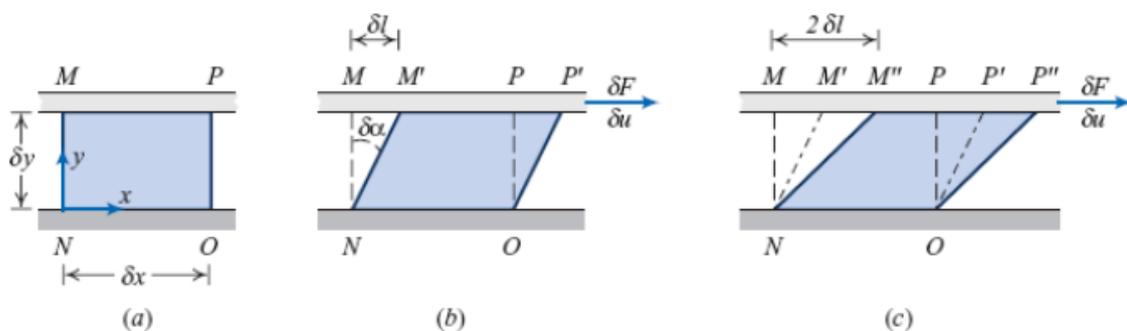
2.1 MECÂNICA DOS FLUIDOS

A mecânica dos fluidos é o estudo de fluidos em repouso ou em movimento. Ela tem permitido o desenvolvimento de muitos campos instigantes no último quarto de século. Um fluido se caracteriza por escoar, ao contrário de um sólido que tende a se deformar quando é interagido. A análise de qualquer problema de mecânica dos fluidos inclui, necessariamente, o estabelecimento de leis básicas que governam o movimento do fluido (FOX, 2010).

Ainda segundo FOX, o ar em suas condições normais de temperatura e pressão, pode ser tratado como um meio contínuo enquanto considerado que um ponto não é maior do que aproximadamente um volume de 10^{-3} mm^3 .

O ar é um fluido que sua tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à sua taxa de deformação, também conhecido como fluido Newtoniano.

Figura 1 – Cisalhamento de elemento fluido



Fonte: Fox (2010)

Na figura 1 podemos notar que um elemento fluido infinitesimal está sendo cisalhado por duas placas planas, onde a inferior permanece estática e a superior se move para a direita com velocidade δu , com uma força constante δF_x e deslocamento de δl . O deslocamento para pequenos ângulos pode ser expresso por:

$$\delta l = \delta y \delta \alpha \quad (1)$$

Durante um intervalo de tempo δt , a deformação do fluido pode ser expressa por:

$$\delta l = \delta u \delta t \quad (2)$$

Igualando para δl e tomando o limite, temos

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Portanto, para fluidos newtonianos, em termos unidimensionais a tensão de cisalhamento τ_{xy} é proporcional à taxa de deformação multiplicado por uma constante de proporcionalidade:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

A constante de proporcionalidade é a viscosidade dinâmica μ , viscosidade essa que também pode aparecer em algumas equações expressa em termos de viscosidade cinemática ν , onde ν representa μ dividido pela densidade ρ do fluido.

A densidade dos gases por sua vez pode ser descrita pela lei dos gases ideais.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (5)$$

Sendo p a pressão do gás, R a constante ideal dos gases e T a temperatura.

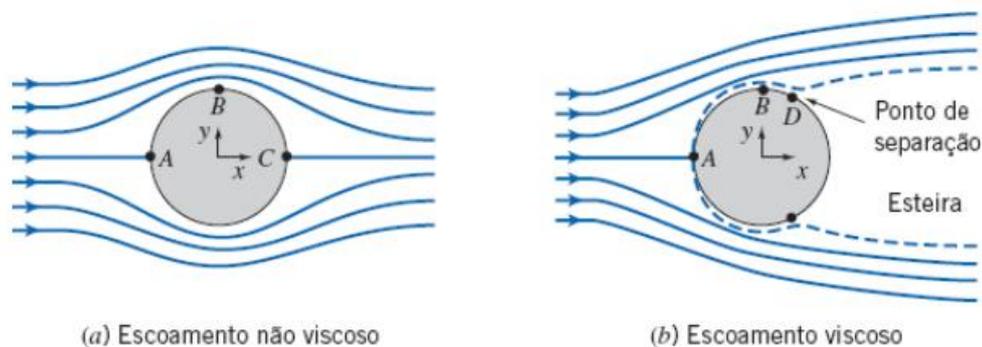
2.1.1 Número de Reynolds

Para sabermos se as forças viscosas são ou não significativas em relação as forças de pressão, é possível utilizar do cálculo do número de Reynolds, cuja equação é:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (5)$$

Onde V é a velocidade do escoamento e L o comprimento do corpo molhado pelo fluido. O número de Reynolds é um parâmetro adimensional que determina as características do escoamento. Baixos valores indicam pouca viscosidade, onde os efeitos de inércia são desprezíveis. Valores médios implicam em um leve escoamento laminar e altos valores geram escoamentos turbulentos (WHITE, 2011).

Figura 2 – Escoamento incompressível em torno de uma esfera

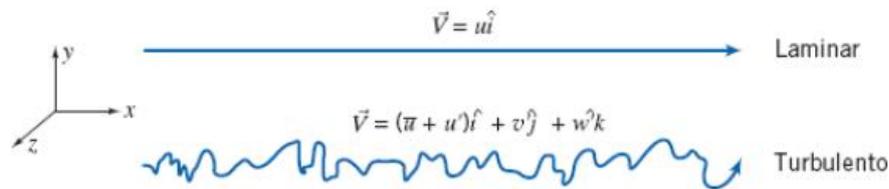


Fonte: FOX (2010)

2.1.2 Escoamento Laminar e Turbulento

Um escoamento laminar é aquele em que as partículas fluidas se movem em camadas lisas, ou lâminas. Um escoamento turbulento é aquele em que as partículas fluidas rapidamente se misturam enquanto se movimentam ao longo do escoamento devido a flutuações aleatórias no campo tridimensional de velocidade (FOX, 2010).

Figura 3 – Trajetória da partícula em escoamentos unidimensionais, laminar e turbulento



Fonte: FOX (2010)

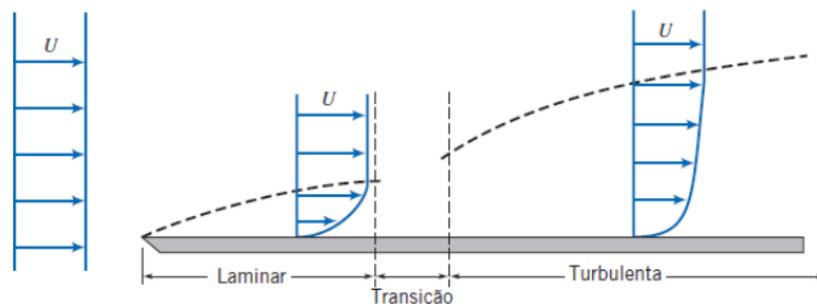
2.1.3 Escoamento Compressível e Incompressível

O escoamento é classificado como compressível ou incompressível dependendo do nível de variação da densidade durante o escoamento. A incompressibilidade é uma aproximação, e um escoamento é dito ser incompressível se a densidade permanecer aproximadamente constante em todos os lugares. Portanto, o volume de cada porção do fluido permanece inalterado durante o decorrer de seu movimento (ÇENGEL 2006).

2.1.4 Camada Limite

Embora as equações completas que descrevem o movimento de um fluido viscoso (Navier-Stokes) tivessem sido desenvolvidas, as dificuldades matemáticas para a sua solução, exceto em alguns casos simples, proibiam um tratamento teórico dos escoamentos viscosos. O conceito de camada limite forneceu o elo que faltava entre a teoria e a prática, introduziu principalmente a possibilidade teórica do arrasto. Além disso, permitiu a solução de problemas de escoamentos viscosos, o que seria impossível pela aplicação das equações de Navier-Stokes ao campo completo do escoamento (FOX et al., 2010).

Figura 4 – Camada-limite sobre uma placa plana (espessura vertical ampliada)

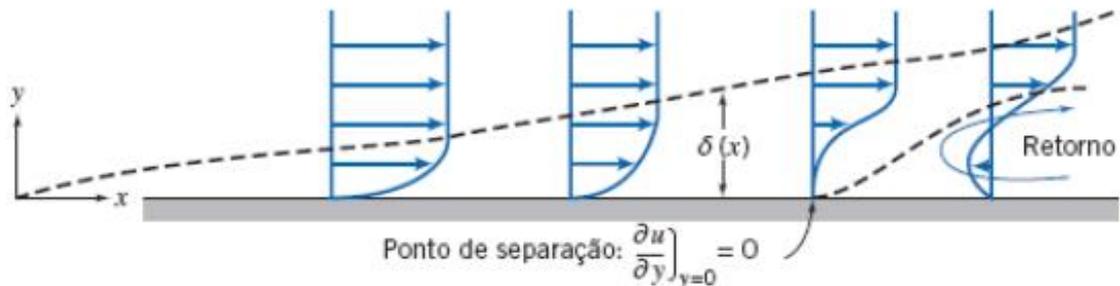


Fonte: FOX (2010)

Desde que não ocorra a separação do fluxo, os efeitos viscosos no fluido estão restritos a uma fina camada de uma espessura de poucos milímetros, a chamada camada limite para além desta camada, o fluxo pode ser considerado como não viscoso, e a sua pressão é aplicada à camada de fronteira. Dentro da camada limite a velocidade diminui a partir do valor do fluxo viscoso externo no bordo exterior da camada limite para zero na parede, em que o fluido apresenta uma condição antiderrapante (HUCHO,1998).

O fluxo laminar e o fluxo turbulento da camada limite tem grande dependência da distribuição de pressão aplicada ao fluxo externo, o que pode gerar a separação da camada-limite e o corpo, como ilustrado na figura 5.

Figura 5 – escoamento em camada-limite com gradiente de pressão



Fonte: FOX (2010)

2.1.5 Equacionamento do movimento do fluido

As equações de Navier-Stokes fazem parte de um conjunto de equações diferenciais parciais não lineares acopladas para a solução de propriedades de transporte relacionadas ao movimento do fluido (velocidade nas três direções u , v , w) acoplando a densidade ρ . A princípio, essas três equações combinadas com a equação da conservação da massa, fornecem uma descrição matemática completa do escoamento incompressível de um fluido Newtoniano (MUSON, 2004). As equações de Navier-Stokes (Eq. 6) e da continuidade ou conservação da massa (Eq. 7) são representadas a seguir.

$$\begin{aligned}
\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\
\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \\
\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{7}$$

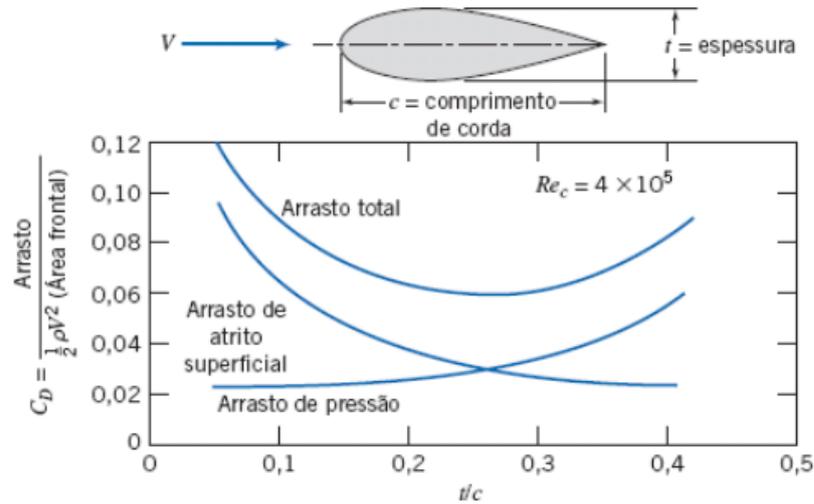
Onde, ρ representa a densidade do fluido, g é a constante de gravidade, u , v e w correspondem a velocidade nas direções x , y e z , respectivamente.

2.1.6 Arrasto

O arrasto geralmente é um efeito indesejado, assim como o atrito, e é feito o melhor possível para minimizá-lo. A redução do arrasto está intimamente associada com a redução do consumo de combustível nos automóveis. Mas em alguns casos, o arrasto produz um efeito benéfico e então é maximizado, como por exemplo em frenagens e na geração de força negativa nos eixos. O arrasto pode ser caracterizado pela força que um fluido exerce sobre um corpo na direção do escoamento (FOX, 2010).

A força de arrasto total é a soma do arrasto de atrito e de pressão. Esses podem ser descritos em função da tensão de cisalhamento na parede, provocada pelos efeitos viscosos e da tensão normal que é devida a pressão (MUNSON, 2004). Na Figura 6 é mostrado a distribuição das forças de pressão e atrito.

Figura 6 – Forças de arrasto viscoso e arrasto de pressão



Fonte: FOX (2010)

O coeficiente de arrasto para escoamento incompressível pode ser definido como:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (8)$$

Sendo C_D o coeficiente de arrasto, F_D a força de arrasto, ρ a viscosidade do fluido, V a velocidade relativa do escoamento e A sendo a área perpendicular ao escoamento projetada.

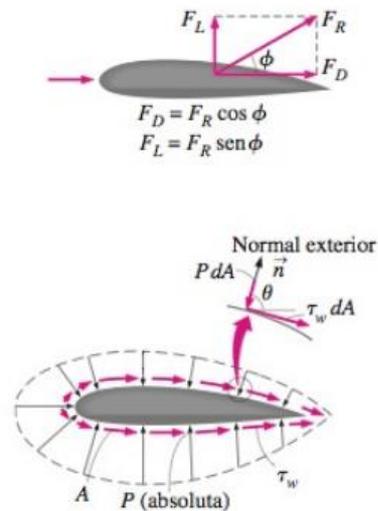
2.1.7 Sustentação

Existe uma força perpendicular ao arrasto atuando no corpo e realiza uma a função de influência sobre o peso do veículo, essa é chamada de força de sustentação. As definições dessas forças são descritas na Equação abaixo. Sendo, F_L a força de sustentação, C_L o coeficiente de sustentação, ρ é a densidade, V a velocidade e A a área frontal projetada.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad (9)$$

As forças de arrasto e sustentação podem ser facilmente visualizadas na figura abaixo, sendo estas duas as componentes das forças resultantes F_R .

Figura 7 – Forças de pressão e forças viscosas agindo em corpo bidimensional



Fonte: ÇENGEL (2005)

2.2 AERODINÂMICA VEICULAR

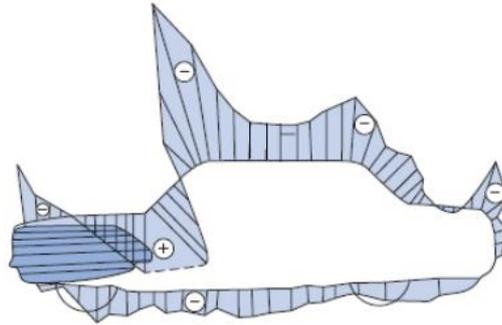
A necessidade de veículos econômicos e a maior preocupação com o aquecimento global, são os principais temas utilizados quando se pensa em aerodinâmica veicular. O desempenho, a manobrabilidade e o conforto de um automóvel são significativamente afetados pela sua aerodinâmica. Um baixo coeficiente de arrasto é um pré-requisito decisivo para um veículo sustentável (HUCHO, 1987).

Ainda segundo HUCHO, o escoamento a que está sujeito um veículo em movimento pode ser dividido em três categorias:

1. Escoamento do ar ao redor do veículo;
2. Escoamento do ar através do veículo;
3. Escoamento dentro dos equipamentos do veículo.

As duas primeiras categorias estão intimamente relacionadas e são altamente acopladas. A terceira categoria se refere aos processos envolvidos dentro dos equipamentos do veículo como, por exemplo, escoamento de ar e gases durante a combustão no motor, escoamento de lubrificantes dentro da transmissão, etc. Esta última categoria não é tratada como sendo aerodinâmica externa. A distribuição de pressão em torno da seção média de um veículo é demonstrada na figura a baixo.

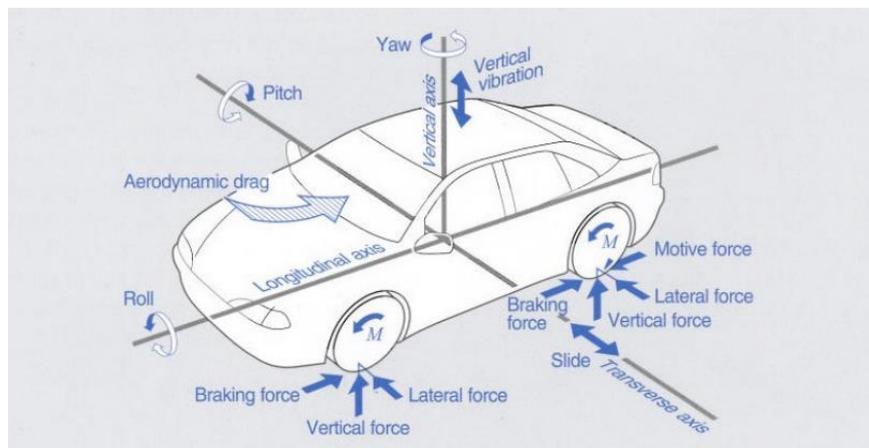
Figura 8 – Distribuição de pressão em torno de veículo



Fonte: FOX (2010)

Assim como o arrasto e a sustentação, existem outras forças e momentos atuantes em veículos, como pode ser visto na Figura 9. No eixo lateral (eixo-y), existe um momento chamado de arfagem ou “pitch” e uma força lateral atuante. No eixo longitudinal (eixo-x) junto a força de arrasto, existe o momento de rolagem ou “roll”. Por fim, no eixo vertical (eixo-z), existe a força de sustentação e o momento de guinada ou “yaw”. Com isso, existem seis componentes atuantes, três de forças e três de momento. (HUCHO, 1987).

Figura 9 - Forças e momentos agindo em um veículo



Fonte: Andersson (2008)

Em termos de dinâmica, por sua vez, o desempenho de um veículo em aceleração, frenagem, dirigibilidade e conforto é uma resposta às forças impostas a ele e muito do estudo de dinâmica veicular envolve o estudo de como e porque estas forças são geradas (GILLESPIE, 1992).

O contato entre os pneus e a pista é a fonte primária de forças e momentos que permitem a movimentação do veículo, assim como seu controle e estabilidade. As forças e torques gerados pelos pneus afetam o veículo de diversas maneiras: suportam seu peso e quaisquer outras forças verticais impostas a ele; geram as forças longitudinais e laterais para movimentação e manobrabilidade; geram forças resistivas que controlam e estabilizam o veículo diante de distúrbios externos provenientes da pista ou de ventos (MILLIKEN & MILLIKEN, 1995).

2.2.1 Força de Arrasto

O arrasto aerodinâmico é uma das principais forças que restringem o movimento de um veículo em alta velocidade. Portanto, a redução dessa força é imprescindível quando se deseja aumentar o rendimento global do veículo. Como visto na Eq. 8, a força de arrasto pode ser definida como:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D \quad (11)$$

Portanto, para reduzir esse parâmetro é necessário diminuir o coeficiente de arrasto C_D ou a área projetada A . Geralmente, não é possível reduzir o tamanho da área frontal de um veículo de carga devido ao volume de espaço ocupado pelo reboque. Deste modo, opta-se por reduzir o coeficiente de arrasto.

Quando o escoamento de ar se choca com a região frontal do veículo a velocidade diminui e a pressão aumenta, essa área é chamada de zona de estagnação. O escoamento começa a percorrer a superfície do veículo, a pressão vai diminuindo e a velocidade aumentando devido ao princípio de Bernoulli (Figura 8). Quando esse fluxo se depara com o ar a alta pressão na traseira do veículo ocorre o descolamento do escoamento, gerando uma esteira de baixa pressão, geralmente com altos níveis de turbulência, completamente dominada por efeitos viscosos. A diferença de pressão gerada na traseira do veículo provoca um aumento um gradiente de pressão negativa ao sentido de deslocamento causando um incremento na força resistiva. Existem outras regiões de separação em um veículo, como por exemplo no retrovisor, que também gera uma esteira e aumenta a força de arrasto.

Segundo HUCHO (1987), para evitar o surgimento dessas esteiras, o escoamento de ar deve se manter colado a superfície do veículo o máximo possível. Isso pode ser alcançado

criando uma geometria com um perfil suave com poucas inclinações agudas e menos descontinuidades na geometria.

2.3 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

Entre as diferentes técnicas que realizam um procedimento numérico visando a determinação da distribuição de esforços, deslocamentos, deformações e temperaturas, destaca-se o método dos elementos finitos. (OROZCO, 2009).

Este método possibilita discretizar um corpo contínuo (de difícil formulação), em um modelo constituído por um número finito de elementos (de formulação conhecida) e interconectados entre si. (RADE, 2011).

Um dos principais cuidados associados a qualquer método numérico, consiste na verificação do grau de discretização do modelo. Em elementos finitos, essa análise é conhecida como estudo de convergência de malha. É necessário verificar se a malha discretizada representa adequadamente o domínio contínuo. Malhas pouco discretizadas não são capazes de representar corretamente o domínio contínuo, enquanto malhas muito discretizadas, exigem um elevado custo computacional. Em outras palavras, deve-se encontrar um número de elementos para subdivisão do domínio que mantenha uma precisão satisfatória da equação e não implique em uso de supercomputadores e por tempo demasiado.

No entanto, devido a sua robustez e eficiência, o método dos elementos finitos tem se tornado cada vez mais presente em projetos de engenharia, principalmente em aerodinâmica.

A discretização passa por determinadas etapas. Primeiramente é modelada geometria do problema real, em seguida são atribuídas as propriedades dos materiais envolvidos. Só então são aplicadas condições de contorno e esforços submetidos. Por fim, ocorre o processo numérico de resolução do sistema de equações composto pelas equações e interligações de cada um dos elementos discretizados na modelagem.

Se a modelagem for coerente, o sistema de equações poderá ser resolvido, permitindo que se conheçam a distribuição dos esforços ao longo do escoamento.

É preciso salientar que os resultados observados são aproximados, quando comparados com testes práticos ou analíticos, ou seja, possuem certo erro.

É justamente por proporcionar confiabilidade, apresentar erros capazes de serem caracterizados, economizar tempo, gerar valor agregado, que o MEF vem sendo utilizado em larga escala pela indústria. (ZIENKIEWICZ, 1994).

A dinâmica dos fluidos computacional, ou simplesmente CFD (*Computational Fluid Dynamics*), é a análise de sistemas envolvendo um fluido em movimento (escoamento) o qual pode (ou não) incluir na análise processos de transferência de calor e outros fenômenos associados, utilizando métodos computacionais via simulação numérica (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Análises realizadas em túneis de vento exigem muito tempo e um alto custo operacional para serem realizadas, as simulações aerodinâmicas se tornaram mais fáceis de serem realizadas com a utilização do CFD, devido a facilidade de impor as condições de contorno que atuam sobre o veículo (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

2.3.1 Modelagem da Turbulência

Os escoamentos são, em geral, turbulentos com elevados números de Reynolds. Esses escoamentos são altamente instáveis, tridimensionais e cujo processo é dependente do tempo. Nesse regime de escoamento a viscosidade passa a ter uma característica aleatória e é por essa razão são necessárias maneiras que possam prever esse comportamento para que os termos das equações que envolvem a viscosidade serem completos. Com isso se faz necessário o uso de uma modelagem de turbulência (COSTA, 2018).

De acordo com Wilcox (1993), na literatura destacam-se três modelagens de turbulência: DNS (Direct Numerical Simulation); LES (Large Eddy Simulation) e RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes).

De acordo com Costa (2018), na abordagem DNS, todas as escalas de turbulência são computadas numericamente, a partir das equações de Navier-Stokes, sem levar em consideração o fato de que as pequenas e grandes escalas de turbulência possuem características físicas diferentes. Entretanto, é necessário alto refinamento de malha para capturar todo o espectro de escalas turbulentas. Com esse requisito, identifica-se um elevado custo computacional para utilização desta técnica.

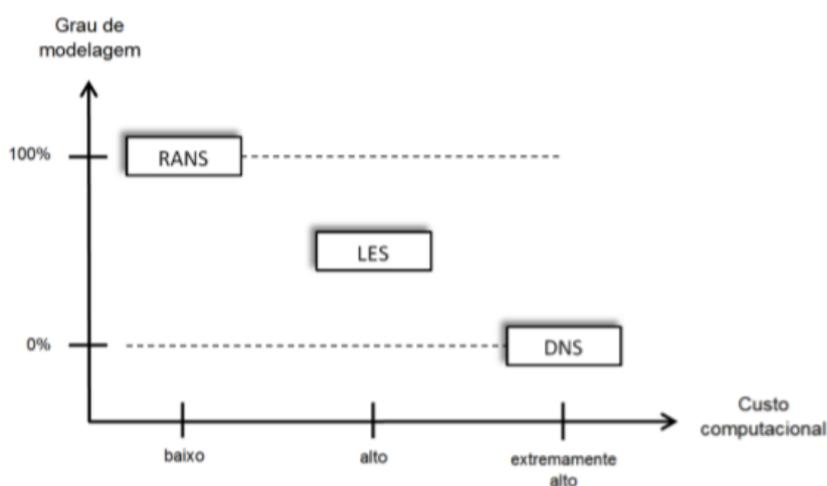
Ainda segundo Costa, na abordagem LES, o intuito é separar as pequenas estruturas das grandes escalas por meio de um processo de filtragem espacial nas equações de Navier-Stokes, nas quais as grandes escalas são resolvidas diretamente pelo método numérico e as pequenas escalas são modeladas pela técnica das sub malhas. A estratégia dessa modelagem é que os grandes turbilhões, afetados pelas condições de contorno e que carregam a maioria das tensões de Reynolds devem ser computados ao mesmo tempo em que as pequenas escalas de

turbulência, pois são as mais fracas e contribuem menos com as tensões de Reynolds. Com isso, são mais fáceis de modelar e conseqüentemente com uma demanda intermediária de recurso computacional.

Nos modelos que empregam a metodologia RANS, a média de Reynolds é um caso particular de filtro e é utilizada para simplificar a modelagem sub malha. Assim, a parcela de modelagem de turbulência é alta e, com isso, enseja em uma menor demanda computacional para realização do cálculo das equações. Um importante aspecto da modelagem de turbulência que deve ser avaliado no momento da seleção do modelo é o dispêndio de esforço computacional para se obter a solução do método numérico para o escoamento turbulento. Esse custo computacional é geralmente expresso em unidades de tempo que o recurso computacional leva para resolver as equações do método numérico e apresentar a solução para o escoamento (COSTA, 2018).

Embora todo modelo de turbulência apresente sua demanda em face ao custo computacional, existem significativas diferenças de consumo desses recursos em função das características do modelo. Percebe-se que quanto maior a demanda da modelagem de turbulência que um determinado modelo requer, menor será seu custo computacional no processo. A figura 10 ilustra o posicionamento das modelagens citadas, ordenando e relacionando os grupos de modelos de turbulência com seus respectivos custos computacionais em relação ao grau de modelagem de turbulência requerido (REZENDE, 2009).

Figura 10 – Relação entre o grau de modelagem e o custo computacional dos modelos de turbulência



Fonte: Rezende (2009)

2.3.2 Principais modelos de Turbulência

Baseados na metodologia RANS, os principais modelos de turbulência empregados em simulações numéricas de escoamentos podem ser classificados através das características do seu equacionamento.

O Modelo de zero equação ou modelos algébricos são baseados na hipótese do comprimento de mistura de Prandtl (SILVEIRA, 2002).

Modelo de uma equação se resume em uma equação de transporte resolvida geralmente para a energia cinética turbulenta k , juntamente com um comprimento de escala característico.

Modelos de duas equações utilizam duas equações de transporte de propriedades turbulentas, sendo uma a equação da energia cinética turbulenta k junto com a equação da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ε , ou a equação da frequência de passagem de grandes estruturas turbulentas ω . Dentro dessa classificação encontram-se os conhecidos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, além de modelos como *Shear Stress Transport* ($k - \omega$ SST) e *Realizable* $k - \varepsilon$.

Modelos algébricos para o tensor de Reynolds utilizam equações algébricas para estabelecer relação entre as tensões turbulentas e as componentes médias de velocidade.

Modelos para o tensor de Reynolds utilizam equações de transporte explícitas para o cálculo das seis componentes do tensor de Reynolds junto com equações de transporte complementar para ε e ω para obter o fechamento completo do sistema. Estes modelos para tensor de Reynolds não dependem da viscosidade.

2.3.3 Teorias de Solução do Escoamento

O Fluent permite que o usuário escolha entre dois métodos de solução, sendo um baseado na pressão e o outro baseado na densidade. Historicamente, o método baseado na pressão foi desenvolvido para escoamentos incompressíveis de baixa velocidade, enquanto o método baseado na viscosidade abordava principalmente escoamentos de alta velocidades e compressíveis. Entretanto, recentemente ambos os métodos foram estendidos e reformulados para resolver e calcular uma alta variedade de fluxos em condições que não condiz com a intenção inicial.

Em ambos os métodos o campo de velocidade é obtido das equações de momento. No método baseado na viscosidade, a equação da continuidade é utilizada afim de obter o campo de densidade enquanto o campo de pressão é determinado pelas equações de estado.

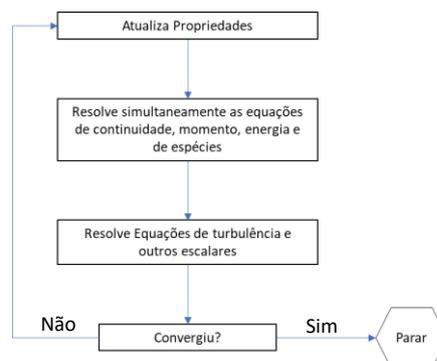
Por outro lado, no método baseado na pressão, o campo de pressão é extraído resolvendo a pressão ou a correção da pressão a qual é obtida manipulando as equações de momento e da continuidade.

2.3.3.1 Solução Baseada na Viscosidade

Segundo o manual do ANSYS (2015), o solucionador baseado em densidade resolve as equações governantes de continuidade, momento e (quando apropriado) energia e transporte de espécies simultaneamente, ou seja, acoplados. As equações de governo para escalares adicionais serão resolvidas posteriormente e sequencialmente (ou seja, segregadas uma da outra e do conjunto acoplado) usando o procedimento descrito na Seção 18.2. Como as equações de governo são não lineares (e acopladas), várias iterações do loop da solução devem ser executadas antes que uma solução convergida seja obtida. Cada iteração consiste nas etapas ilustradas na Figura 11.

Primeiramente se atualiza as propriedades do fluido com base na solução atual. (Se o cálculo acabou de começar, as propriedades do fluido serão atualizadas com base na solução inicializada.), posteriormente é resolvido as equações de continuidade, momento e (quando apropriado) energia e espécie simultaneamente. Quando apropriado, resolve-se as equações para escalares, como turbulência e radiação, usando os valores atualizados anteriormente das outras variáveis. Então verifica-se a convergência do conjunto de equações. Essas etapas continuam até que os critérios de convergência sejam atendidos.

Figura 11 – Visão Geral da Solução Baseado em Densidade

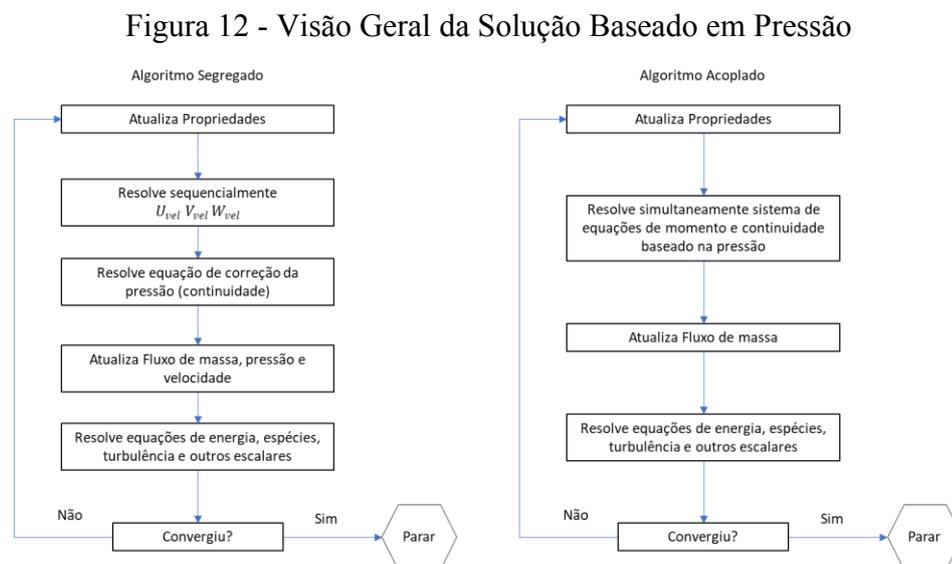


Fonte: Ansys (2005)

2.3.3.2 Solução Baseada na Pressão

Segundo o manual do ANSYS (2015), o solucionador baseado em pressão emprega um algoritmo que pertence a uma classe geral de métodos denominada método de projeção. No método de projeção, a restrição de conservação de massa (continuidade) do campo de velocidade é alcançada através da resolução de uma equação de pressão (ou correção de pressão). A equação da pressão é derivada das equações de continuidade e momento de tal maneira que o campo de velocidade, corrigido pela pressão, satisfaz a continuidade. Como as equações de governo são não lineares e acopladas entre si, o processo de solução envolve iterações em que todo o conjunto de equações de governo é resolvido repetidamente até que a solução convirja.

Dois algoritmos de resolução baseados em pressão estão disponíveis no Fluent. Um algoritmo segregado e um algoritmo acoplado. Essas duas abordagens são ilustradas na figura abaixo.



Fonte: Ansys (2005)

O solucionador baseado em pressão usa um algoritmo de solução em que as equações de governo são resolvidas sequencialmente (ou seja, segregadas umas das outras). Como as equações de governo são não lineares e acopladas, o loop da solução deve ser executado iterativamente para obter uma solução numérica convergente.

No algoritmo segregado, as equações individuais para as variáveis da solução são resolvidas um após o outro. Cada equação governante, enquanto está sendo resolvida, é

"dissociada" ou "segregada" de outras equações, daí seu nome. O algoritmo segregado é eficiente em termos de memória, pois as equações discretizadas precisam ser armazenadas apenas na memória uma por vez. No entanto, a convergência da solução é relativamente lenta, na medida em que as equações são resolvidas de maneira dissociada.

Ao contrário do algoritmo segregado descrito acima, o algoritmo acoplado à base de pressão resolve um sistema acoplado de equações que compreende as equações de momento e a equação de continuidade com base em pressão. Assim, no algoritmo acoplado, as etapas 2 e 3 no algoritmo de solução segregada são substituídas por uma única etapa na qual o sistema de equações acoplado é resolvido. As equações restantes são resolvidas de maneira dissociada, como no algoritmo segregado.

Como as equações de momento e continuidade são resolvidas de uma maneira intimamente acoplada, a taxa de convergência da solução melhora significativamente quando comparada ao algoritmo segregado. No entanto, o requisito de memória aumenta em 1,5 a 2 vezes em relação ao algoritmo segregado, pois o sistema discreto de todas as equações de continuidade baseadas em pressão e momento precisa ser armazenado na memória ao resolver os campos de velocidade e pressão (em vez de apenas uma única equação, como é o caso do algoritmo segregado).

2.3.3.3 Algoritmo Baseado em pressão SIMPLE

O algoritmo *SIMPLE* usa uma relação entre correções de velocidade e pressão para reforçar a conservação de massa e obter o campo de pressão. Este algoritmo substitui as equações de correção de fluxo pela equação discreta da continuidade para obter uma equação discreta para a correção de pressão. A equação de correção da pressão pode ser resolvida usando o método multimalha algébrico. Uma vez obtida a solução, a pressão no elemento e o fluxo na face são corrigidos.

2.3.3.4 Algoritmo Baseado em pressão SIMPLEC

Uma série de variantes do algoritmo acima citado está disponível na literatura. O Fluent oferece além do *SIMPLE*, o algoritmo *SIMPLEC* (*SIMPLE-Consistent*). *SIMPLE* é o padrão, porém, alguns problemas podem se beneficiar do uso do *SIMPLEC*. O procedimento é semelhante ao anterior, diferindo apenas uma expressão utilizada para correção do fluxo de

face. Para malhas com algum grau de assimetria, a relação aproximada entre a correção do fluxo de massa na face do elemento e a diferença das correções de pressão nos elementos adjacentes é muito difícil. Após a solução inicial da equação de correção da pressão, o gradiente de correção da pressão é recalculado e usado para atualizar as correções do fluxo de massa. Esse processo, chamado de "correção de assimetria", reduz significativamente as dificuldades de convergência associadas a malhas altamente distorcidas. A correção de assimetria *SIMPLEC* permite ao Fluent obter uma solução em uma malha com grau alto de assimetria em aproximadamente o mesmo número de iterações necessárias para uma malha mais ortogonal.

2.3.3.5 Algoritmo Baseado em pressão PISO

Outro algoritmo disponível é o *Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO)*. O esquema de acoplamento pressão-velocidade, parte da família SIMPLE de algoritmos, baseia-se no maior grau da relação aproximada entre as correções de pressão e velocidade. Uma das limitações dos algoritmos *SIMPLE* e *SIMPLEC* é que novas velocidades e fluxos correspondentes não satisfazem o equilíbrio do momento após a equação de correção da pressão ser resolvida. Como resultado, o cálculo deve ser repetido até que o saldo seja satisfeito. Para melhorar a eficiência desse cálculo, o algoritmo *PISO* executa duas correções adicionais: correção de vizinho e correção de assimetria. A ideia principal do algoritmo *PISO* é mover os cálculos repetidos exigidos pelo *SIMPLE* e *SIMPLEC* para o estágio de solução da equação de correção da pressão. Após um ou mais laços *PISO* adicionais, as velocidades corrigidas satisfazem as equações de continuidade e momento mais de perto. Esse processo iterativo é chamado de correção de momento ou "correção de vizinho".

O algoritmo *PISO* leva um pouco mais de tempo de CPU por iteração de solucionador, mas pode diminuir drasticamente o número de iterações necessárias para a convergência, especialmente para problemas transientes. Para malhas com algum grau de assimetria, a relação aproximada entre a correção do fluxo de massa na face da célula e a diferença das correções de pressão nas células adjacentes é muito difícil. Após a solução inicial da equação de correção da pressão, o gradiente de correção da pressão é recalculado e usado para atualizar as correções do fluxo de massa. Esse processo, chamado de "correção de assimetria", reduz significativamente as dificuldades de convergência associadas a malhas altamente distorcidas.

A correção de assimetria *PISO* permite ao Fluent obter uma solução em uma malha com grau alto de assimetria em aproximadamente o mesmo número de iterações necessárias

para uma malha mais ortogonal. Para malhas com um alto grau de assimetria, o acoplamento simultâneo das correções vizinhas e de assimetria na mesma fonte da equação de correção de pressão pode causar divergência ou falta de robustez.

Um método alternativo, embora mais caro, para lidar com as correções de vizinhança e de assimetria dentro do algoritmo *PISO* é aplicar uma ou mais iterações de correção de assimetria para cada iteração separada da correção de vizinhança. Para cada iteração individual do algoritmo *PISO*, permite um ajuste mais preciso da correção do fluxo de massa da face de acordo com o gradiente normal de correção da pressão.

2.3.3.6 Algoritmo Baseado em pressão COUPLE

O solucionador baseado em pressão permite solucionar o problema de fluxo de maneira segregada ou acoplada. O uso da abordagem acoplada *COUPLE* oferece algumas vantagens sobre a abordagem não acoplada ou segregada. O esquema combinado obtém uma implementação monofásica robusta e eficiente para fluxos de estado estacionário, com desempenho superior comparado aos esquemas de solução segregada.

Esse algoritmo acoplado à pressão oferece uma alternativa ao algoritmo segregado com base na densidade e na pressão com acoplamento pressão-velocidade do tipo *SIMPLE*. Para fluxos transitórios, é necessário o uso do algoritmo acoplado quando a qualidade da malha é ruim ou se etapas de bastante tempo são usadas.

O algoritmo segregado baseado em pressão resolve a equação do momento e as equações de correção da pressão separadamente. Esse método de solução semi-implícita resulta em convergência lenta.

O algoritmo acoplado resolve as equações de continuidade baseadas em pressão e momento. O acoplamento implícito completo é obtido através de uma discretização implícita dos termos do gradiente de pressão nas equações de momento e uma discretização implícita do fluxo de massa da face, incluindo os termos de dissipação de pressão de Rhie-Chow.

2.3.4 Malha Computacional

Em uma simulação de CFD, o volume de ar ao redor de um corpo é dividido em uma malha composta de “pequenos” volumes, para os quais são realizados os cálculos de conservação de massa e momento. De forma geral, quanto mais fina a malha, mais precisos são

os resultados e maior o tempo e capacidade de processamento necessários para realizar a simulação (CÓSTOLA et al., 2011).

A complexidade da geometria impacta diretamente na dificuldade e detalhamento. É muito importante realizar um refinamento da malha mais preciso nas regiões onde se tem turbulência (VERGEL, 2013).

Segundo o manual do ANSYS (2015), outros dois fatores são importantes para os resultados: A qualidade e a assimetria da malha. Ambos além de influenciar a precisão dos resultados, também controlam a estabilidade da simulação. A qualidade da malha está relacionada a ortogonalidade dos elementos, ou seja, se refere ao desvio do ângulo entre o vetor que conecta o centro dos volumes adjacentes e o vetor normal à superfície entre eles. Já o fator de assimetria mede a torção na malha, e representa o desvio do vetor que liga os centros das células e o vetor normal à face.

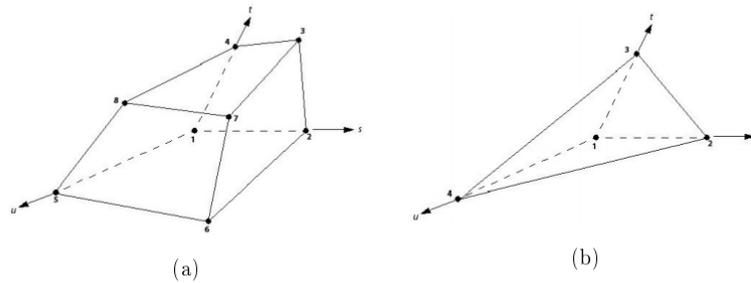
Uma malha adequada é fundamental para uma simulação numérica, sendo o controle mais efetivo para erros de discretização. É importante também para evitar alguns erros durante a solução dos sistemas que caracterizam o modelo. A geração de uma malha de qualidade depende da escolha do tipo de elemento utilizado (tetraédrico ou hexaédrico), e da verificação de métricas que estimam a deformação desses elementos.

Deve-se também verificar se a malha gerada é refinada o suficiente para que a solução independa da disposição de seus elementos. Isso é realizado individualmente para cada modelo, através de testes de convergência e sensibilidade de malha.

2.3.4.1 Tipos de Elementos

Malhas computacionais são compostas, predominantemente, de elementos tetraédricos e hexaédricos, exemplificados na Figura 13. Em geral, o tipo de elemento de uma malha é escolhido com base em seu tempo de pré-processamento, custo computacional durante a solução, e acurácia numérica (SILVA, 2016).

Figura 13 – Principais tipos de elementos de malha: (a) Hexagonal e (b) tetraédrico



Fonte: Ansys (2005)

Elementos tetraédricos se adequam facilmente a geometrias complexas e, em códigos comerciais, podem ser gerados com algoritmos automáticos. Já malhas com elementos hexaédricos frequentemente necessitam de decomposições geométricas ou construção manual da malha, o que pode aumentar consideravelmente o tempo de pré-processamento de uma análise. Por esse motivo, malhas tetraédricas são predominantes em aplicações industriais. Entretanto, malhas hexaédricas necessitam de menor poder computacional durante a solução que uma malha tetraédrica equivalente (ANSYS, 2015). Sendo assim, é frequentemente mais rápido completar uma simulação com malha hexaédrica.

A diferença de acurácia entre os dois tipos de malha foi, no passado, um argumento proibitivo ao uso de malhas tetraédricas. Porém atualmente, os solucionadores comerciais têm algoritmos robustos o suficiente para resolver malhas não estruturadas com precisão, tornando a escolha do tipo de elemento dependente do tipo de fenômeno modelado.

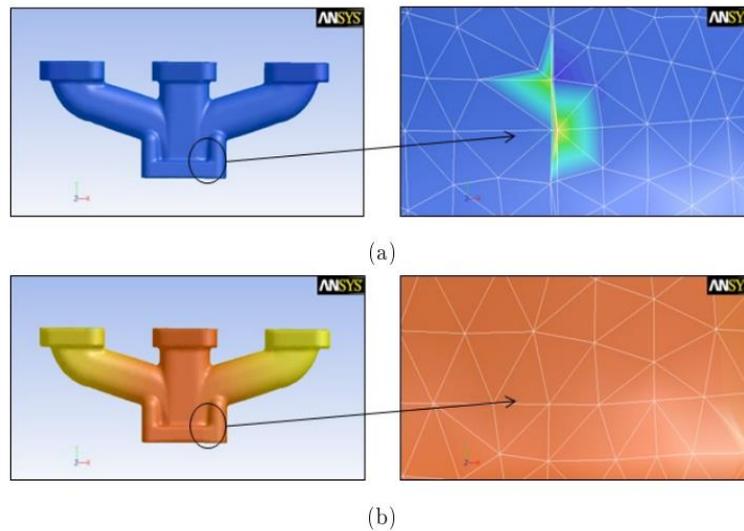
Com frequência, escoamentos têm comportamento direcional, como por exemplo o perfil de escoamento em torno de um aerofólio, ou interno a um duto. Em casos de escoamento direcional, é indicado que a orientação da malha siga a direção do escoamento, o que pode ser atingido através das faces de elementos hexaédricos. Já em uma malha tetraédrica haverá, necessariamente, elementos com faces que cruzam a direção do escoamento (SILVA, 2016).

2.3.4.2 Qualidade dos Elementos

A qualidade de malha influencia diretamente, tanto na convergência de uma simulação, quanto em seus resultados. A Figura 14 exemplifica esta influência, comparando os resultados encontrados em uma simulação estrutural com malha de baixa qualidade (a) e boa

qualidade (b). É notável como elementos muito deformados acarretam em concentração de gradientes na região afetada do domínio.

Figura 14 – Impacto na solução com malha de (a) baixa qualidade e (b) boa qualidade



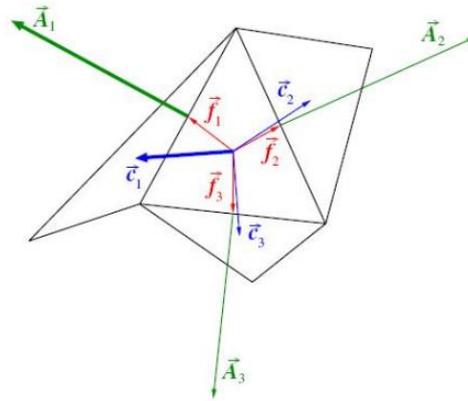
Fonte: Ansys (2005)

Há diversos critérios disponíveis para avaliar a qualidade de malha, e medir a deformação de seus elementos. Uma das principais métricas está relacionada com a ortogonalidade dos elementos, ou seja, quão próximos os ângulos entre faces adjacentes dos elementos se aproximam do ângulo ótimo (90° para hexaedros). A Equação 20 apresenta o cálculo utilizado na determinação do parâmetro de qualidade ortogonal,

$$\theta = \min \left(\frac{\vec{A}_i \vec{f}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{f}_i|}, \frac{\vec{A}_i \vec{c}_i}{|\vec{A}_i| |\vec{c}_i|} \right) \quad (20)$$

Onde \vec{A}_i é a normal da face do elemento, \vec{f}_i é um vetor do centroide do elemento ao centroide da face, e \vec{c}_i é um vetor do centroide do elemento ao centroide do elemento vizinho que compartilha a face em questão. A qualidade ortogonal do elemento é dada pelo menor valor calculado em todas as suas faces. A Figura 15 ilustra os vetores dos elementos empregados no cálculo (SILVA, 2016).

Figura 15 – Vetores empregados no cálculo da qualidade ortogonal na equação 20



Fonte: Ansys (2005)

Valores de qualidade ortogonal acima de 0,15 (15% de deformação) são considerados aceitáveis, e indicam malhas de qualidade razoável, segundo a Figura 16. O valor máximo de θ é 1, que representa o elemento ideal.

Figura 16 – Medida da qualidade ortogonal da malha

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Fonte: Ansys (2005)

2.3.4.3 Convergência e Sensibilidade de Malha

O Ansys indica realizar um estudo de convergência e/ou sensibilidade de malha, de modo a demonstrar que os resultados obtidos independem da resolução da malha. Em um estudo de convergência de malha, resultados são avaliados em regiões de interesse do estudo. Podem ser comparados valores em um ponto, ou resultados médios em um plano de corte, por exemplo. Conforme a malha é refinada e aprimorada, a variação de resultados nestas regiões diminui, e assume comportamento assintótico, independente da malha. Se a simulação foi bem definida, a assíntota corresponde ao resultado real da aplicação estudada.

Já em um estudo de sensibilidade de malha, propriedades consideradas importantes no estudo (velocidade, pressão, etc.) são comparadas ao longo de uma linha do domínio. O propósito é garantir, não que a solução independa da malha, mas que a influência da malha nas

propriedades estudadas seja baixa. Essa avaliação é realizada graficamente, e a malha é considerada suficiente refinada quando o comportamento da propriedade estudada tem variação pequena em relação a outras malhas. Testes de sensibilidade de malha, apesar de geralmente avaliar uma maior extensão do domínio, são limitados, pois dependem diretamente do usuário para a avaliação da malha. Como não há parâmetros numéricos de avaliação, o conceito de “variação pequena” entre malhas torna-se subjetivo. Nesse caso, várias propriedades e regiões do domínio devem ser estudadas para obter uma interpretação ampla dos resultados (SILVA, 2016).

2.3.5 Análise de Convergência

A convergência em simulações CFD é, em geral, monitorada a partir de resíduos numéricos. Para cada iteração, um resíduo, definido como a diferença normalizada entre a iteração vigente e a anterior, é calculado. Há dois tipos de resíduos: Resíduo Médio (RMS) e Resíduo Máximo (MAX).

O Resíduo Médio (RMS) é obtido utilizando a Equação 21, onde R_i é o resíduo calculado em cada elemento da malha. O Ansys recomenda um alvo para RMS de 10^{-5} para problemas de engenharia nos quais seja necessária alta precisão, ou estudos acadêmicos.

$$RMS = \sqrt{\sum R_i^2} \quad (21)$$

Como o RMS depende de todos os elementos da malha, este tipo de resíduo não é indicado para modelos nos quais a região principal de interesse seja relativamente pequena (vazamentos, dispersão de gases, etc.), já que o erro nesta região será mitigado pelo restante do domínio.

O Resíduo Máximo (MAX) representa o resíduo máximo (em módulo) encontrado no domínio. É um critério de convergência mais apertado que o RMS. De fato, o Ansys estima que o resíduo máximo costuma ser, pelo menos, 10 vezes maior que o RMS em aplicações regulares, e consideravelmente maior em escoamentos externos ou quando a região de interesse é uma área pequena do domínio (SILVA, 2016).

2.3.6 Parâmetro Y^+

O YPlus (Y^+) é um parâmetro usado em simulações CFD para avaliar a qualidade da camada limite na superfície de um objeto ou em uma região específica de um domínio de simulação. A camada limite é uma região muito importante em problemas de fluxo de fluido próximo a uma superfície. Ela é caracterizada por gradientes de velocidade significativos e variações nas propriedades do fluido, como a viscosidade. A resolução adequada da camada limite é crucial para obter resultados precisos e confiáveis.

O parâmetro YPlus é definido como a relação entre a espessura da camada limite (δ) e o tamanho de célula (Δy) usada na malha de discretização. Matematicamente, é expresso como $Y^+ = \delta/\Delta y$, ou seja, é uma medida adimensional que indica o quanto a malha está capturando detalhes da camada limite.

Existem duas regiões principais de interesse quando se trata de YPlus. Valores baixos (Y^+ em torno de 1), a camada limite está sendo bem resolvida pela malha. Isso significa que a espessura da camada limite é próximo do tamanho da célula da malha, permitindo a captura precisa dos gradientes de velocidade e das variações nas propriedades do fluido. Geralmente, é desejável ter YPlus baixo para simulações que envolvem fluxo turbulento, pois permite a modelagem precisa dos fenômenos turbulentos. YPlus alto ($Y^+ > 30$), a malha não está resolvendo adequadamente a camada limite.

A espessura da camada limite é maior do que o tamanho da célula da malha, o que pode levar a erros e imprecisões nos resultados. YPlus alto é comumente aceito em simulações de fluxo laminar, pois a camada limite nesses casos é mais espessa e menos sensível a variações detalhadas.

A escolha do valor adequado de YPlus depende do tipo de fluxo, das propriedades do fluido, do modelo de turbulência e da configuração do problema em questão. É sempre importante considerar o equilíbrio entre a resolução da camada limite e o custo computacional, pois diminuir o YPlus exigirá uma malha mais refinada e, conseqüentemente, mais recursos e mais tempo de simulação.

Em resumo, o YPlus é um parâmetro importante em simulações CFD que indica a qualidade da resolução da camada limite. Um YPlus baixo é desejável para simulações turbulentas, enquanto um YPlus alto é aceitável para fluxos laminares.

3 METODOLOGIA

A principal ferramenta para desenvolvimento de projeto aerodinâmico em veículos de rua ou de competição é o túnel de vento. Por intermédio desta ferramenta é possível reproduzir o fluxo de ar que o veículo é submetido em uma situação real. Porém túneis de vento são instalações complexas com um alto custo de operação, fato que faz com que somente grandes fabricantes e equipes tenham acesso a esse tipo de ferramenta. Outro fator que aumenta os custos de ensaios em túneis de vento é a necessidade de se construir um modelo em escala real ou reduzida do veículo, e cada alteração nesse modelo exige horas de trabalho e novos ensaios.

Devido ao alto custo dos ensaios em túneis de vento, a Fluidodinâmica computacional vem ganhando cada vez mais espaço como ferramenta de desenvolvimento em projetos aerodinâmicos automotivos. O grande benefício do emprego de CFD é que os modelos são virtuais, o que dispensa a construção de modelos físicos para a análise. Porém, o CFD é uma ferramenta complementar no desenvolvimento de projeto e não deve substituir a teoria e a experimentação.

3.1 MODELAGEM

Para que se possa estudar os efeitos aerodinâmicos em qualquer que seja o objeto de estudo, é necessário que se tenha um modelo tridimensional do mesmo. O objetivo inicial deste trabalho era analisar o escoamento ao redor do caminhão todo, porém, com o desenvolvimento das atividades, foi verificado que não seria possível realizar tal tarefa de maneira satisfatória devido a limitações computacionais. Para que fosse possível analisar o caminhão todo, seria necessário que fossem feitas modificações na geometria a fim de simplificá-la, tornando-a genérica demais para que o resultado fosse relevante no estudo.

Este capítulo irá escorrer brevemente como foram feitas as modelagens do caminhão, mas destaca-se o fato do restante do trabalho estar restrito ao estudo da asa que compõe o teto do caminhão.

3.1.1 Escaneamento 3D

Dada a complexidade do objeto, para realizar a confecção do modelo, adotou-se a estratégia de escaneamento 3D. O scanner utilizado foi o sensor LiDAR que compõe o conjunto

de câmeras dos Iphones 12 em diante, nas linhas Pro e Pro Max. O sensor LiDAR é um tipo de sensor de profundidade que realiza o mapeamento 3D com certa precisão e utiliza pulsos de laser para tal. A sigla LiDAR significa “Light Detection and Ranging” e possui quatro elementos principais:

- Emissor de laser: Responsável por emitir os pulsos de luz infravermelhos que irão se espalhar pelo objeto/ambiente;
- Scanner: Distribui os feixes de laser e regula a velocidade e a distância com que eles escaneiam o alvo;
- Sensor LiDAR: Faz a detecção de luz, registrando cada pulso que é refletido de volta para o dispositivo, para medir a profundidade de campo;
- GPS: Acompanha e registra a localização do sistema LiDAR, e usa dados de satélite para validar as distâncias entre objetos (Escaneamentos grandes).

Foi feita uma parceria entre o autor e o dono da equipe R9 competições, que representa todos os caminhões Volkswagen da competição. Em troca da tentativa de melhorar o desempenho de seus caminhões, foi dado total acesso aos mesmos. A figura 17 mostra o caminhão alvo do estudo.

Figura 17 – Caminhão Copa Truck da equipe R9 Competições



Fonte: Cortesia Equipe R9

O escaneamento feito por este dispositivo mescla a câmera do próprio aparelho para gerar um modelo em malha no formato (.obj) e dois arquivos de textura (.jpg e .mtl) como pode se observar na figura 18.

A quantidade de elementos de malha armazenados no aparelho não é grande o suficiente para fazer o caminhão todo em um único arquivo uma vez que o menor elemento que compõe a malha é de tamanho 5mm, portanto, foram feitos vários setores do objeto de maneira segregada e unidos posteriormente no Fusion 360.

Figura 18 – Escaneamento da parte frontal inferior do caminhão



Fonte: Autor (2023)

Com todas as partes compondo o objeto, foi possível modelar a geometria utilizando o escaneamento como parâmetro e chegou-se no resultado da figura 19.

Figura 19 – Modelagem do caminhão

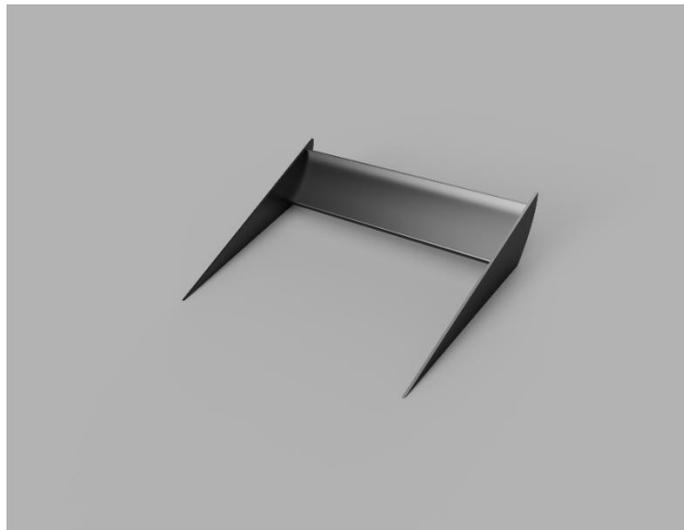


Fonte: Autor (2023)

3.1.2 Geometria do Modelo

Como mencionado no começo desta seção, não foi possível prosseguir com o estudo aerodinâmico do conjunto todo, portanto, doravante será adotado para o estudo deste trabalho o modelo sendo apenas a asa do teto do caminhão como mostra a figura 20.

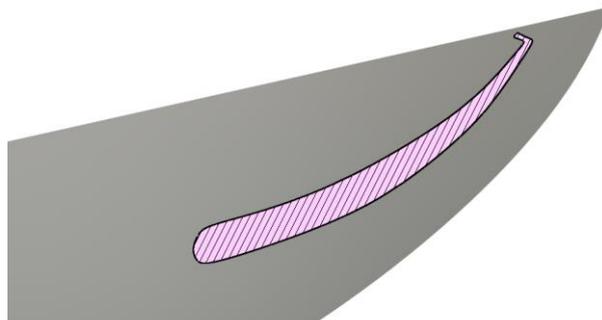
Figura 20 – Asa do caminhão



Fonte: Autor (2023)

O perfil da asa em vista de corte lateral pode ser visto na figura 21. A modelagem segue fiel o perfil escaneado do caminhão modelo.

Figura 21 – Asa em vista de corte lateral



Fonte: Autor (2023)

O motivo para a escolha da asa é que o regulamento técnico regido pela Comissão Brasileira de Automobilismo (CBA) é amplo no que diz respeito à asa, permitindo fazer qualquer mudança que se queira, apenas respeitando as dimensões estipuladas e a localização. O item 17.2 do regulamento técnico diz ser obrigatório o uso de um aerofólio (asa) no teto da cabine, desde que respeitadas às seguintes medidas máximas: Altura = 350mm, comprimento = 400mm e largura = 1700mm, sendo que o mesmo (asa) não poderá ultrapassar mais que 350mm além da traseira da cabine.

3.2 ESTUDO DE MALHA

O processo de configuração de malha computacional consiste em uma das partes mais importantes do processo de simulação em CFD. A malha é responsável por representar a geometria do modelo a ser estudado.

Uma malha grosseira apresentará pouca precisão nos resultados por não representar fielmente o modelo, porém uma malha refinada demanda mais tempo para solução além de ser limitada pela quantidade de memória RAM do computador utilizado. O grande desafio na geração de malha está em obter aquela que represente o modelo estudado de forma mais fiel possível sem comprometer a precisão dos resultados e com um tempo de resolução que seja tolerado pelos prazos de desenvolvimento de projeto.

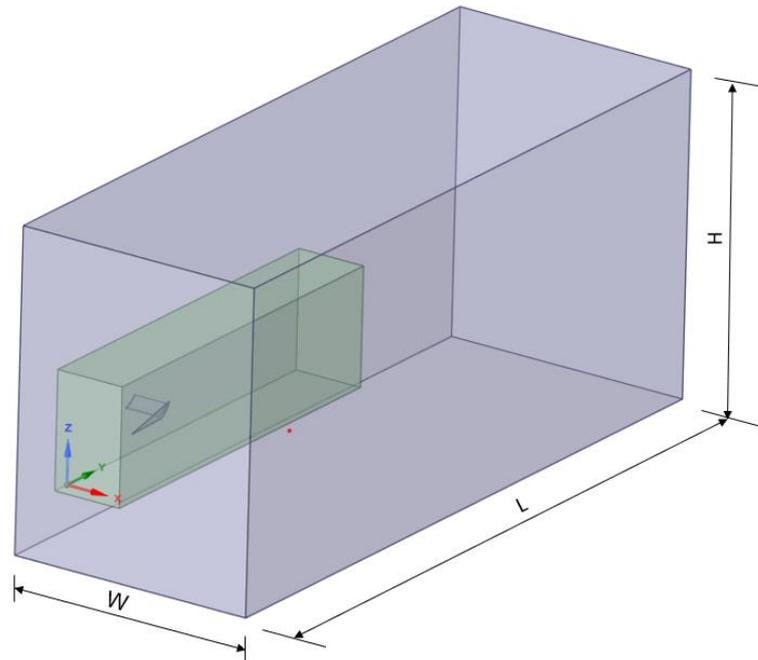
O recurso computacional disponível para o projeto é um computador com um processador AMD Ryzen 7 2700x e 64Gb de memória RAM.

3.2.1 Domínio Computacional

O domínio computacional refere-se a uma forma simplificada do domínio físico, tanto em termos de representação geométrica quanto de imposição de condições de contorno. Essa forma simplificada deve manter todas as características fisicamente importantes do problema, mas pode ignorar detalhes menores. Por exemplo, ao simular o fluxo de fluido em torno de um carro, pode-se ignorar as lacunas entre as portas, enquanto o limite real do domínio de fluxo de fluido pode ser substituído por um limite simples semelhante a uma caixa (LI, 2008).

Desta forma o domínio computacional foi dimensionado de forma retangular, semelhante a seção de um túnel de vento para as análises em 3D. As dimensões são para largura (W) 6m, comprimento (L) 16m e altura (H) 7,5m e são representadas na Figura 22.

Figura 22 – Dimensões do domínio computacional



Fonte: Autor (2023)

Para melhor alocação dos recursos computacionais, foi utilizado um modelo de simetria, envolvendo apenas a metade do modelo da asa e utilizando o plano YZ como plano de simetria.

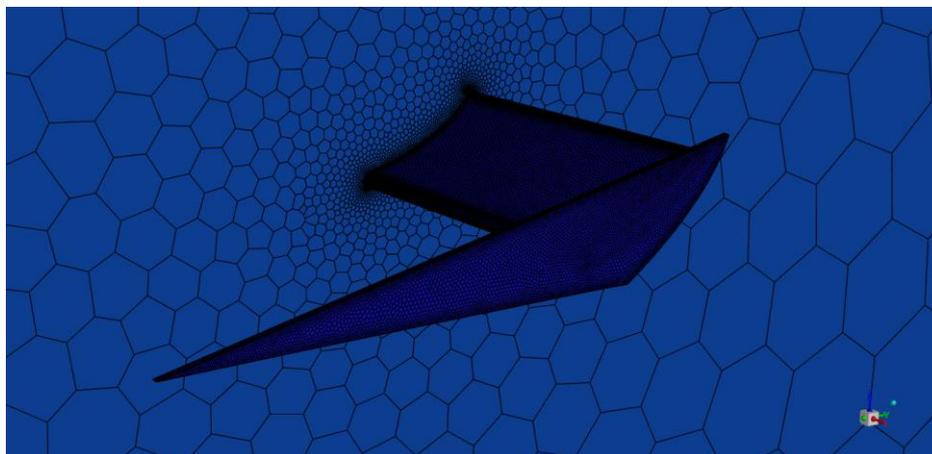
A caixa em verde da figura 22 representa uma geometria chamada de corpo de influência e se tornará uma ferramenta posteriormente para que se possa fazer refinamento na malha na região que compreende a caixa.

3.2.2 Geração das malhas

Desenvolveu-se algumas malhas para a geometria do estudo com diferentes valores para tamanho de mínimo de células, refinamentos e corpo de influência. Existem alguns programas que geram a malha, como o próprio Ansys, que possuem um módulo chamado Ansys Meshing, onde este é o mais conhecido gerador de malha para simulações de CFD dentro da plataforma. Entretanto, para este projeto será utilizado o gerador de malha do Fluent, sendo este mais robusto, com mais opções de elementos e mais controles de refinamento.

Para gerar os elementos no domínio, começa-se gerando a malha de superfície como mostra a figura abaixo e posteriormente se calcula a malha do volume.

Figura 23 – Malha de superfície de menor refino de elementos poliédricos



Fonte: Autor (2023)

O dimensionamento da malha superficial é feito utilizando a função *sizing* e os dados definidos para esta malha estão contidos na tabela 1.

Tabela 1 – Valores relevantes para o dimensionamento da malha de superfície

Parâmetros	Valor			
	<i>Mesh</i>			
	A	B	C	D
Malha Paralela	16 Cores	16 Cores	16 Cores	16 Cores
Mínimo Global de Refino	1mm	1mm	0,2mm	0,2mm
Máximo Global de Refino	500mm	500mm	500mm	500mm
Taxa de Crescimento	1.2	1.2	1.2	1.2
Refino do Corpo de Influência	-	20mm	15mm	35mm
Refino de Curvatura Máximo	10mm	10mm	8mm	4mm
Refino de Curvatura Mínimo	1mm	1mm	0.2mm	0.2mm
Ângulo Normal de refino de Curvatura	9	9	9	9
Refino de proximidade Máximo	4mm	4mm	2mm	2mm
Número de Células do Vão	3	5	7	7
<i>Skewness</i> Máximo	0.96	0.75	0.71	0.78

Fonte: Autor (2023)

Posterior a conclusão da malha de superfície, é calculado o volume que não possui células do domínio para que se possa preencher o restante do espaço com elementos. Para a escolha dos elementos, o *Fluent* fornece algumas dicas no material de ajuda para que oriente o usuário a obter a melhor malha para o caso a ser simulado.

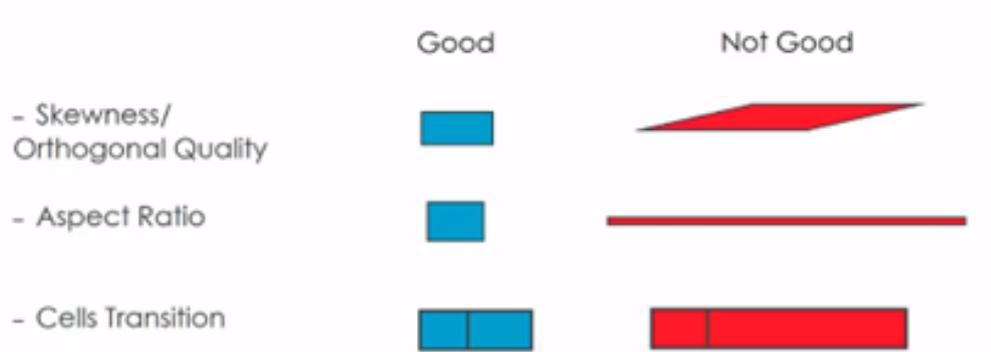
Os elementos prismáticos são os mais comumente utilizados para capturar a camada superficial, onde estes pode ter sua qualidade comprometida ao ser aplicada em superfícies complexas. O elemento que é mais indicado para capturar os efeitos da camada viscosa é o elemento hexaédrico e é muito utilizado para a camada *Inflation*, porém, este elemento encontra dificuldades em copiar geometrias com alta complexidade. Para maior resolução e modelagem de superfícies complexas o elemento mais indicado é o tetraédrico, contudo, esta configuração demanda maior poder de processamento e maior tempo de simulação para solucionar.

Outra opção seria utilizar elementos poliédricos, que combinam alguns elementos tetraédricos e reduz a contagem de elementos em torno de 3 a 5 vezes para a mesma configuração em comparação a malha tetraédrica bem como reduz a demanda computacional, entretanto, aumenta significativamente o uso de memória RAM.

A escolha pelo *Fluent Meshing* se dá por um recurso incrementado na versão do *Ansys v19* em diante, que é a malha Poly-Hexcore. Este recurso oferece a possibilidade de se aproveitar dos benefícios de mais de um elemento combinado. A camada superficial é constituída de elementos prismáticos que copiam bem a complexidade da geometria, o volume do fluido é constituído de elementos hexaédricos e a transição entre estas camadas são feitos com elementos poliédricos.

Um aspecto mencionado na seção 2.3.4.2 é o da qualidade dos elementos e esta não deve ser desprezada, pois irá ser um ponto importante para a convergência do resultado e na obtenção de um resultado acurado. É exemplificado na figura 24 os parâmetros para mensuração da qualidade dos elementos.

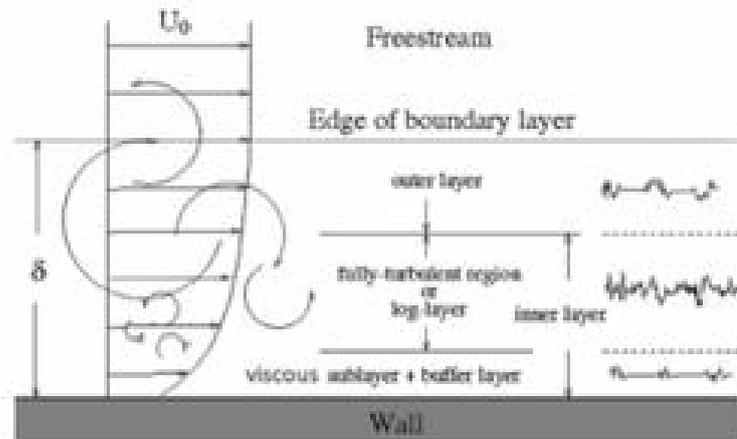
Figura 24 – Qualidade dos elementos da malha



Fonte: Adaptado de LEAP (2018)

Como mostrado na seção 2.1.4, o escoamento por uma superfície gera a camada limite. Esta camada se divide em regiões como mostra a figura 25.

Figura 25 – Subdivisão da camada limite

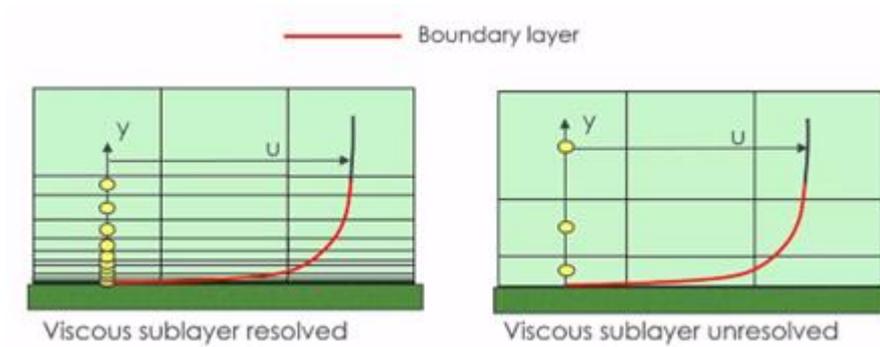


Fonte: Adaptado de LEAP (2018)

Para gerar os elementos do restante do volume do domínio, é necessário se atentar a camada que está contida na camada limite, criando elementos menores que interpolem os efeitos viscosos com um grau satisfatório de resolução.

A subdivisão da camada limite implica na geração dos elementos próximos a superfície pois, se não houver elementos o suficiente que capturem o gradiente que existe dentro da camada limite o resultado estará sujeito a erros a menos que se utilize uma função de parede.

Figura 26 – Relação de elementos e a resolução da camada limite



Fonte: Adaptado de LEAP (2018)

Pode-se então obter as malhas completas do projeto tendo em vista todas as recomendações supracitadas e as configurações para estas estão relacionadas na tabela 2.

Tabela 2 – Valores relevantes para geração das malhas no domínio

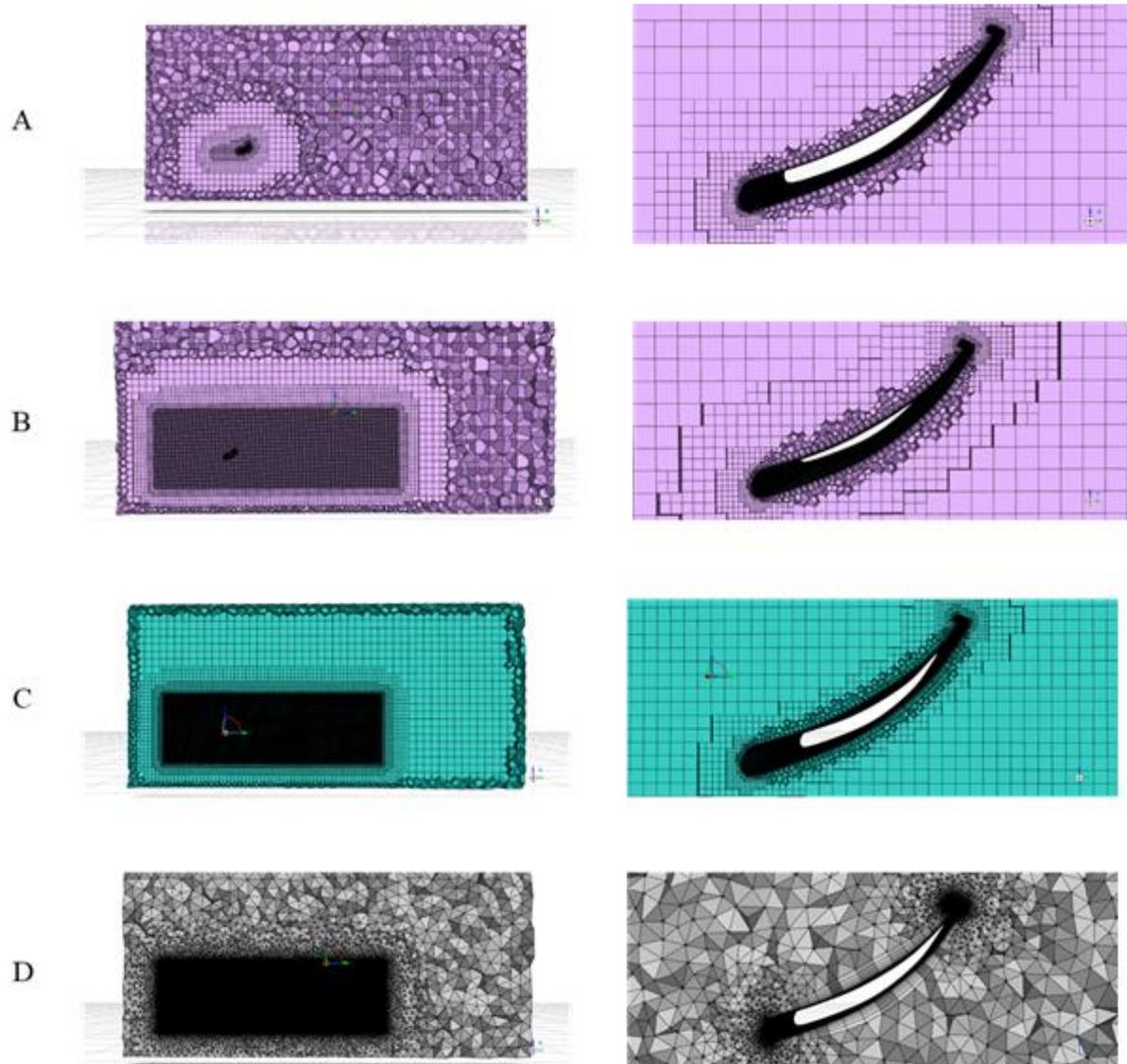
<i>Parâmetros</i>	<i>Valor</i>			
	<i>Mesh</i>			
	A	B	C	D
Topologia do Domínio	PolyHex	PolyHex	PolyHex	Tetrahed.
<i>Inflation</i>	Last Ratio	Last Ratio	Last Ratio	Last Ratio
Altura da Primeira Camada	0.04mm	0.04mm	0.04mm	0.02mm
Número de Camadas	8	10	18	18
Última Porcentagem	20	20	20	20
Número de Elementos	1M	3M	5.5M	20.6M
RAM Requerida para simular a malha	18GB	25GB	42GB	57GB

Fonte: Autor (2023)

3.2.3 Comparativo das Malhas

Na figura abaixo é possível ver um comparativo entre os elementos do domínio das quatro malhas do estudo em uma vista de corte.

Figura 27 – Comparativo entre as malhas



Fonte: Autor (2023)

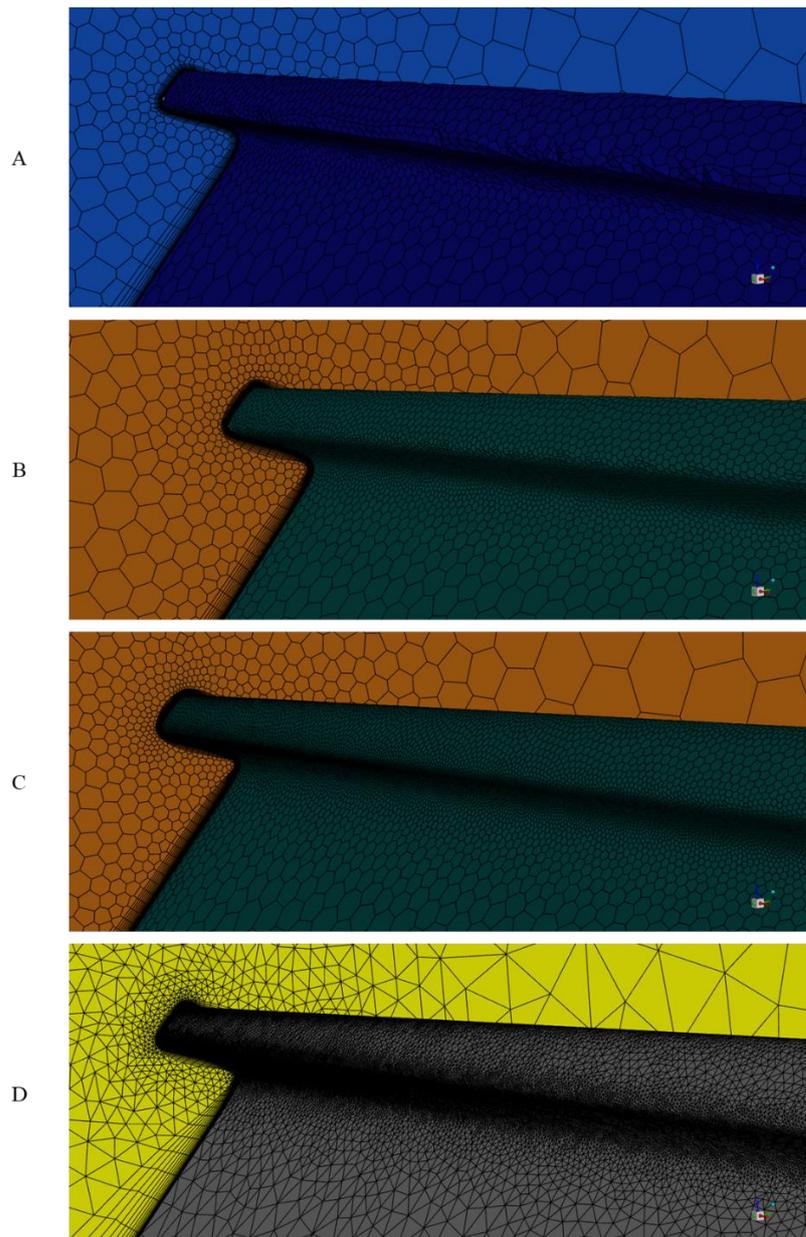
Pode se observar na figura 27 que a malha A não utiliza a técnica de corpo de influência e é a mais grosseira do estudo, totalizando em torno de 1 milhão de elementos. A malha B inclui o corpo de influência limitando os elementos dentro da geometria em 20mm e proporciona uma melhor resolução do escoamento na área de turbulência.

A diferença dos elementos da malha C para a malha B é o tamanho máximo dos elementos do corpo de influência, sendo estes limitados a 15mm e aumentando o número de elementos de 3 milhões para 5,5 milhões.

Ab malha D utiliza topologia tetraédrica sendo essa a única diferente das demais. O número de elementos é aumentado significativamente para quase 21 milhões, porém, esta malha não necessita de tanto recurso computacional quando a PolyHexcore empregada nas anteriores.

Para analisar a qualidade da malha, não basta que se aumente o número de elementos e esperar que os resultados sejam precisos. Deve se analisar como os elementos se encaixam na geometria e os elementos estão copiando essa geometria de forma adequada. Para tal análise, será ilustrado na figura seguinte uma vista aproximada do topo da asa e um comparativo entre os elementos que compõe a aresta superior da asa.

Figura 28 – Comparativo entre as malhas de superfície



Fonte: Autor (2023)

Nas malhas A e B, os elementos do topo da asa não são pequenos o suficiente para formarem uma aresta bem definida como deveria ser na geometria de referência, indicando

baixa qualidade dessas malhas. Ao contrário das malhas A e B, a resolução de elementos empregada nas malhas C e D foi capaz de reproduzir a forma de maneira satisfatória, cabendo à análise dos resultados das simulações para definir qual será a melhor opção a ser adotado para o trabalho.

3.3 SOLUÇÃO PRELIMINAR

As condições de contorno devem estar coerentes e o mais próximo possível das medidas das condições em túnel de vento. Na maioria dos casos, a velocidade do escoamento e intensidade de turbulência no túnel de vento são conhecidos. Portanto, a condição de contorno para a velocidade-entrada é utilizada para modelar o fluxo que entra no volume do controle. A magnitude e direção da velocidade são especificadas juntamente com os valores de turbulência na entrada. O valor da velocidade de entrada foi definido como 50 m/s na direção perpendicular ao plano frontal do objeto.

3.3.1 Modelo de Turbulência

Como mencionado na seção 2.3.2, os modelos mais utilizados e mais estudados nas simulações CFD são os modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$. Historicamente, o modelo $k - \varepsilon$ foi o primeiro a ser desenvolvido dentre esses dois modelos, porém, fora constatado que as funções de parede que eram necessárias no modelo se tornavam não confiáveis quando aplicado à uma série de escoamentos e variando demasiadamente quando não se utilizava o escoamento empregado na calibração do modelo.

Em resposta a este comportamento, o modelo $k - \omega$ foi criado para que se pudesse ter um melhor resultado do comportamento próximo à parede, seja menos sensível aos escoamentos e não precisasse de funções de parede. O modelo $k - \omega$ aplicado à escoamentos externos acabou apresentado comportamento sensível à intensidade de turbulência aplicada na superfície de controle de entrada.

Tanto nos modelos $k - \varepsilon$ e $k - \omega$, o escoamento não estava sendo separado de maneira correta da superfície do modelo quando comparado aos resultados experimentais, e isso acontecia basicamente porque a tensão de cisalhamento na parede estaria muito alta. Portanto, o *SST* $k - \omega$ (*Shear Stress Transport* $k - \omega$) foi proposto por Menter em 1994 com a proposta de resolver estes problemas e prever melhor o ponto de separação do escoamento em análises

aerodinâmicas externas, sendo este o modelo escolhido pelo autor para resolver os casos deste trabalho.

Menter (1994) faz um comparativo entre os modelos em seu artigo e demonstra tecnicamente as vantagens de se utilizar o modelo proposto por ele mesmo neste tipo de simulação.

3.3.2 Controles de Solução

Para o estudo de malha, todas as malhas construídas tiveram domínios com quantidade de elementos suficientemente baixo para que seja possível a utilização do método COUPLED como é mencionado na seção 2.3.3. No decorrer deste trabalho, a medida que a complexidade geométrica aumentar e/ou a quantidade de elementos na geometria aumentar pode se fazer necessário utilizar os métodos de controle segregado de solução.

3.3.3 Condições de Contorno

Juntamente com algumas variáveis definidas pelo autor como velocidade do escoamento, o material de ajuda do Ansys indica a utilização de alguns valores típicos para condições de contorno de entrada e de turbulência. Os valores, portanto, são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Valores relevantes para as condições de contorno

Parâmetros	Valor
<i>Entrada Velocidade</i>	Velocidade: 50m/s on Eixo Y Intensidade Turbulenta: 1% Taxa Viscosidade Turbulenta: 10
<i>Saída Pressão</i>	Especificação de Pressão Média Pressão Zero Manométrica Intensidade Turbulenta de Fluxo Reverso: 5% Taxa Viscosidade Turbulenta de Fluxo Reverso: 10
<i>Face Inferior</i>	Funções de Parede sem Escorregamento
<i>Face Lateral</i>	Funções de Parede sem Escorregamento
<i>Face Superior</i>	Funções de Parede sem Escorregamento
<i>Plano Simetria</i>	Condição de Simetria

Fonte: Autor (2023)

Pode se notar pela tabela acima que o chão, o topo e a lateral estão em condição de não escorregamento com velocidade na parede igual à zero. Isso é aceitável, pois, as paredes se encontram distantes do objeto. Há também a possibilidade de utilizar função de escorregamento nestas paredes nas simulações futuras a fim de economizar tempo de simulação, uma vez que isso não irá interferir nos resultados.

3.3.4 Controles de Solução

Para os controles de solução, são utilizados valores para número de Courant e fatores de relaxamento indicados pelo Lanfrit (2005), e são descritos na tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos controles de solução

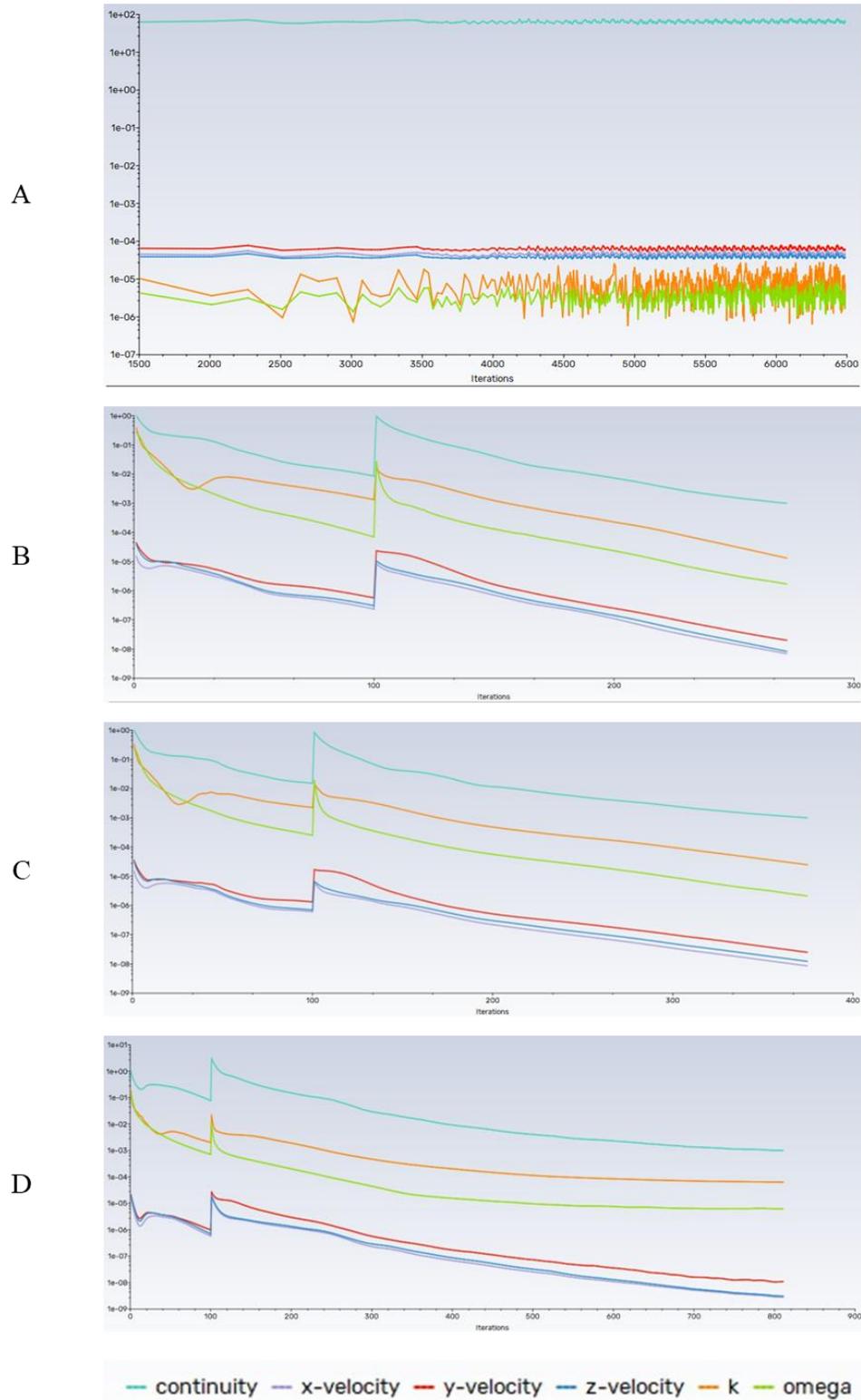
<i>Parâmetros</i>	<i>Valores</i>
<i>Número de Fluxo Courant</i>	50
<i>Fatores de relaxamento explícitos</i>	
<i>Momento</i>	0.25
<i>Pressão</i>	0.25
<i>Fatores de Sub-relaxamento</i>	
<i>Densidade</i>	1
<i>Forças de Corpo</i>	1
<i>Energia Cinética Turbulenta</i>	0.8
<i>Taxa Dissipação Turbulenta</i>	0.8
<i>Viscosidade Turbulenta</i>	0.95
<i>Limites</i>	
<i>Taxa de viscosidade máxima turbulenta</i>	1.10^7

Fonte: Autor (2023)

3.3.5 Resultados das Simulações

O resíduo médio foi utilizado como critério de convergência com valor mínimo de 10^{-3} em paralelo à condição de não haver mais mudanças na quarta casa decimal das variáveis de interesse por pelo menos 15 iterações. As cem primeiras iterações são feitas em modelo de interpolação de primeiro grau e as posteriores são calculadas em interpolação de segundo grau. Isto é feito para se dar uma boa estimativa do campo de velocidade no escoamento inicialmente aumentando a estabilidade da convergência sem comprometer a precisão posterior dos dados.

Figura 29 – Comparativo entre as soluções dos casos



Fonte: Autor (2023)

Na figura 29, é possível notar que a malha A não convergiu e seus resultados só pioram à medida que as iterações aumentam, tendo sua interrupção na interação de número 6500.

A malha B apresentou comportamento estável e convergiu em aproximadamente 270 iterações. Apesar da convergência e da rapidez, existe o problema apontado na figura 28, onde a aresta do topo da asa não está totalmente definida, podendo assim gerar erro no resultado.

A malha C levou 380 iterações para atingir a convergência requerida e também se apresentou estável. Esta malha é a mais refinada dentre as PolyHexcore e teve as arestas da geometria muito bem definidas e terminou em relativo pouco tempo.

A malha D é a malha tetraédrica e a mais refinada de todas, utilizando quase toda memória RAM disponível. A densidade de elementos eleva significativamente o número de iterações para mais de 800.

Por consequência da incapacidade de chegar aos critérios de convergência, a malha A é descartada como opção modelo para o trabalho. A malha B apesar de convergir, o problema geométrico dela faz com que a mesma não se qualifique para modelo também.

A tabela abaixo demonstra quantitativamente os resultados das quatro simulações.

Tabela 5 – Valores finais dos coeficientes

<i>Malha</i>	Cd	Cl
<i>A</i>	-	-
<i>B</i>	0,221	-0,319
<i>C</i>	0,220	-0,317
<i>D</i>	0,219	-0,314

Fonte: Autor (2023)

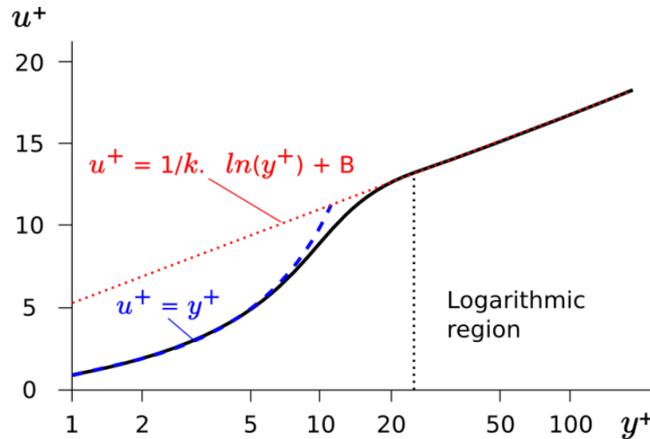
Como mostra os dados da tabela 5, a variação entre os resultados entre a malha B e C e entre C e D não ultrapassa 1%. Uma vez que as malhas A e B já foram descartadas como opção anteriormente, cabe definir qual é a melhor opção para o trabalho entre a malha C e D. Apenas com uma análise crua dos dados, ambas estariam adequadas e não apresentam discrepância de resultado entre elas. Como último critério de avaliação, será analisado o comportamento do escoamento próximo da parede, analisando graficamente o parâmetro YPlus.

3.3.6 Comparação do YPlus

Como descrito na seção 2.3.6, o parâmetro YPlus é importante na acurácia da simulação, pois dependendo do valor, pode ou não estar em uma região de transição e isso pode

levar à valores discrepantes. A região de transição no YPlus está situada entre aproximadamente 5 e 30 na escala logarítmica e é ilustrada na figura 30.

Figura 30 – Comparação do YPlus linear e logaritmico com curva típica de resultado



Fonte: CFD Online (2011)

Sendo B uma constante de valor aproximado de 5.1, k a constante de Von Karman de valor aproximado 0.41 e u^+ um parâmetro adimensional de velocidade para escoamento próximo à parede que é definido por

$$u^+ = \frac{U}{u_*} \quad (21)$$

onde U é a velocidade local e u_* é a velocidade de fricção próximo da parede e pode ser calculado por

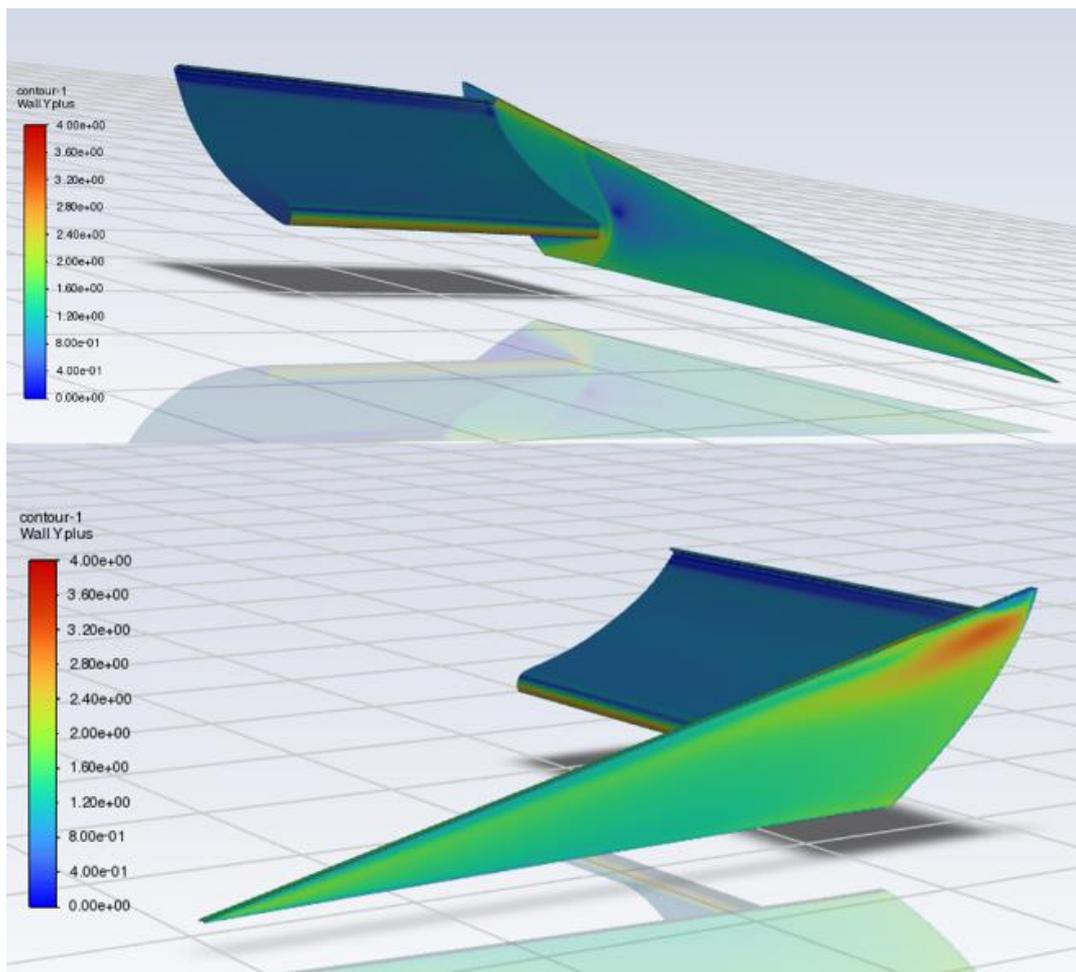
$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_\omega}{\rho}} \quad (22)$$

Sendo τ_ω a tensão de cisalhamento na parede e ρ a densidade do fluido do escoamento. Para analisar se o YPlus da malha está fora da região de transição, não é necessário calcular as equações apresentadas, bastando verificar se o parâmetro está fora desta região, ou seja, ou o YPlus é maior que 30 (não indicado neste caso, pois não se utiliza função de parede), ou o YPlus é menor que 5 (ideal é mais próximo de 1) para que se resolva o perfil da camada limite como demonstra a figura 26. Para tal, extrai-se o gráfico do YPlus da superfície do modelo

(Figura 31) com a legenda variando de zero a quatro. A malha C corresponde a figura 31a e a malha D a figura 31b.

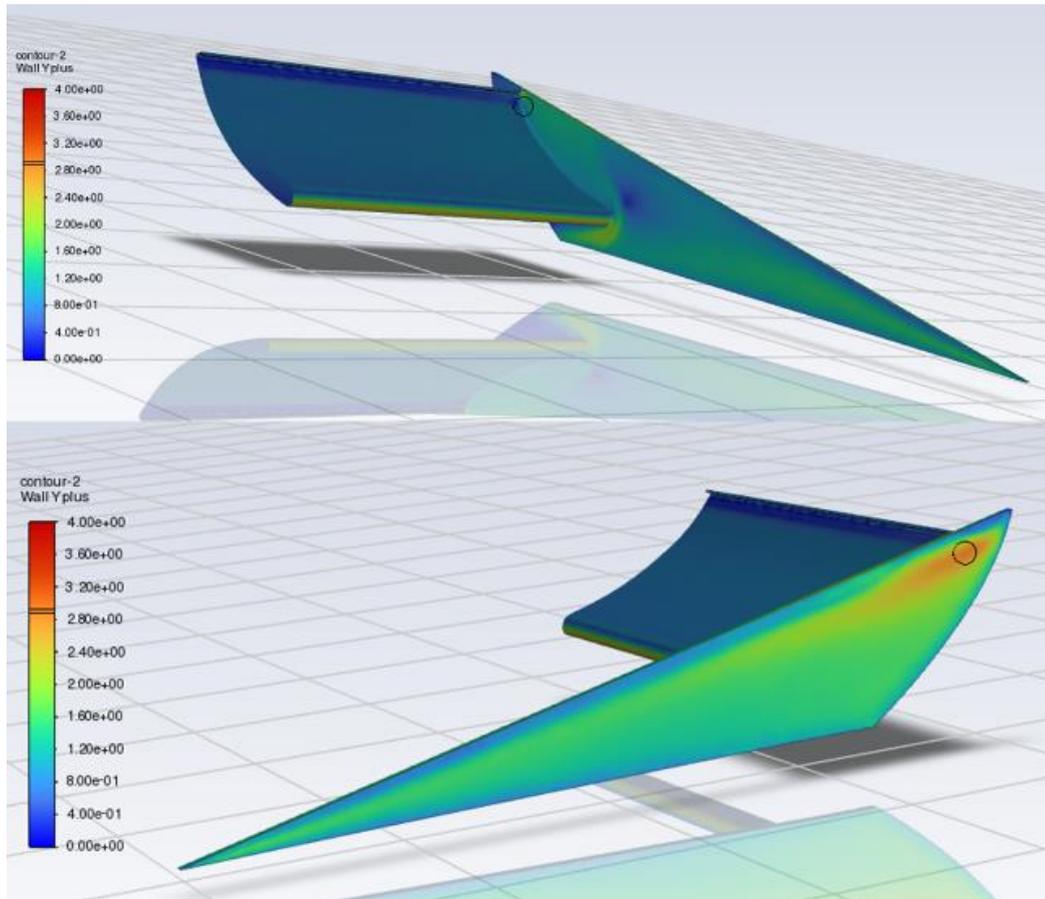
O valor máximo para YPlus foi de 3,05 na malha C e 2,95 na malha D ambos localizados na área circulada na figura 31. Conclui-se que ambas as malhas estão fora da região de transição e não apresentarão erros relacionados a isso nas soluções do domínio, qualificando as duas para o uso nas simulações futuras do trabalho.

Figura 31 – YPlus da malhas C e D (Parte 1)



Fonte: Autor (2023)

Figura 32 – YPlus da malhas C e D (Parte 2)



Fonte: Autor (2023)

Com base em todos os dados mostrados nesta seção 3.3, tanto a malha C quanto a D estão aptas a gerarem resultados satisfatórios nas simulações. Como o modelo foi construído a partir de uma asa que foi confeccionada sem seguir um padrão (NACA por exemplo) tão pouco está equipada com sensores que possam medir as forças atuantes na mesma, os resultados numéricos não podem ser validados experimentalmente. Neste caso, o estudo de malha se fez necessário para que se assegure que a malha seja bem construída e estruturada à fim de gerar resultados que condizem com a realidade.

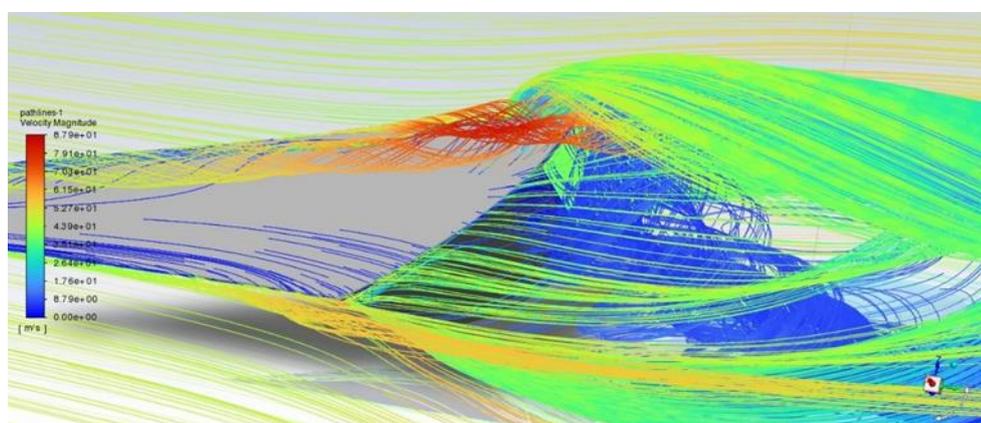
Para os estudos seguintes, será adotado a configuração da malha C, pois, esta utiliza menos recursos computacionais, é mais simples de ser gerada e converge mais rapidamente comparada a malha D, uma vez que a diferença de coeficientes entre elas foi muito pequena.

4 RESULTADOS

A asa do estudo foi submetida a simulações com diferentes velocidades para que se determinasse o perfil de variação do coeficiente de arrasto e sustentação em função da velocidade, porém, não houve variações significativas dentre as simulações que compreendem valores entre 20 e 50 metros por segundo para o escoamento. Uma causa provável para que isto ocorra, seria o fato de a asa estar com ângulo de inclinação elevado, ocasionando o descolamento do escoamento nas extremidades da asa, isto também é conhecido com estol, e faz com que a asa perca boa parte da sustentação.

O coeficiente de sustentação para esta asa é de -0,32 e o coeficiente de arrasto 0,22, fazendo com que a proporção sustentação/arrasto em módulo ser 1,45. A imagem 32 ilustra as linhas de corrente do escoamento e, é possível observar claramente que o escoamento inferior à asa não é aderido à superfície, ou seja, o escoamento desacelera como ilustra a coloração azul e é formada uma região de recirculação nesta área.

Figura 33 – Linhas de Corrente na Geometria de Referência



Fonte: Autor (2023)

Existe força descendente sendo gerada na configuração original em que a asa se apresenta, que é objetivo da asa, porém, ao custo de um alto arrasto relativo. O interesse é maximizar a força descendente ao passo de não aumentar expressivamente o arrasto, gerando assim, uma melhor relação C_l/C_d .

Existem uma infinidade de modelos de asas que podem ser aplicadas para esta função e testadas, porém, este trabalho irá adotar uma abordagem mais prática e utilizar como inspiração de uma asa melhor o modelo de um carro de fórmula 1 de 2019, ano este que o foco

das asas eram gerar força sem que tenha que fornecer um ar mais limpo para o carro que está atrás.

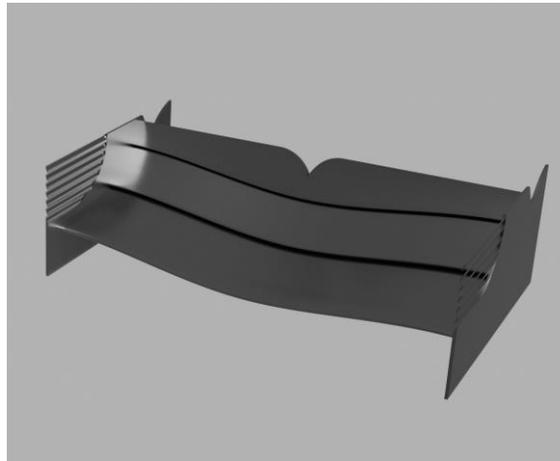
Figura 34 – Asa traseira de um fórmula 1 2019



Fonte: Globo Esporte (2019)

A figura 34 ilustra a modelagem da asa do carro apresentado na figura acima.

Figura 35 – Modelo de asa traseira de um fórmula 1 2019

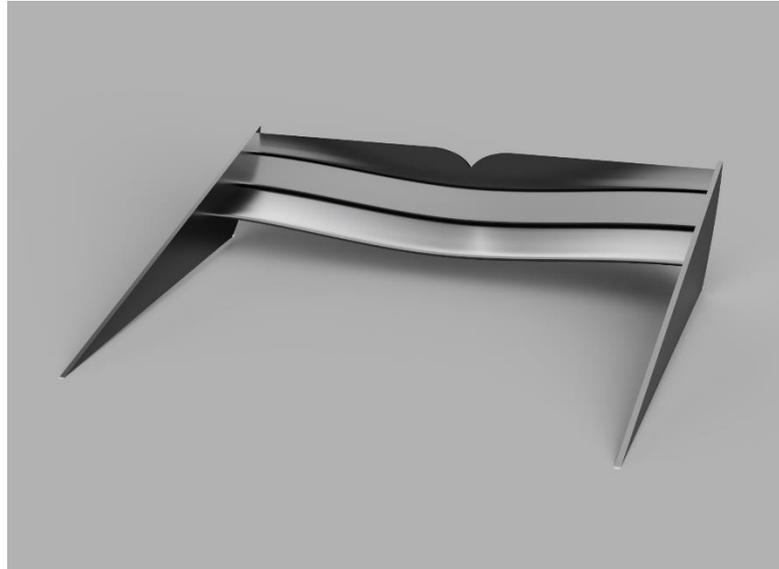


Fonte: Autor (2023)

Para que este conceito de asa possa ser utilizado no caminhão da Copa Truck é preciso que se ajuste o tamanho para que se adeque as restrições dimensionais contidas nas regras impostas pela CBA, e para tal, utilizou-se da ferramenta de escala assimétrica e a asa foi então expandida lateralmente e comprimida do plano transversal. A fim de facilitar uma possível

transição de asa, utilizou-se da estrutura já existente nos caminhões, resultando no modelo apresentado na figura 35.

Figura 36 – Modelo otimizado proposto



Fonte: Autor (2023)

Os resultados comparando os coeficientes da asa otimizada proposta e a asa referência obtidos segundo a metodologia do capítulo 3, podem ser observados na tabela abaixo.

Tabela 6 – Comparativo dos coeficientes

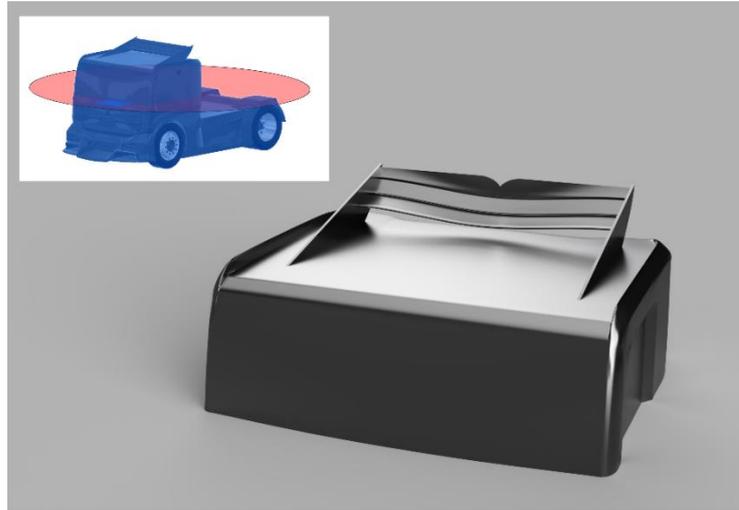
<i>Geometria</i>	Cd	Cl
<i>Asa Referência</i>	0,22	-0,32
<i>Asa Otimizada</i>	0,32	-0,98

Fonte: Autor (2023)

É notável a diferença na eficiência na geração de forças descendentes entre os modelos, uma vez que o modelo referência fornece uma razão Cl/Cd de 1,45, o modelo otimizado apresenta a mesma relação com valor de 3,06. Isto significa que o modelo otimizado é capaz de gerar muito mais forças verticais por unidade de arrasto.

Estes valores apresentados na tabela 6 foram obtidos submetendo as geometrias à escoamentos livres como mostra a figura 27. Para que se possa analisar os efeitos do teto da cabine do caminhão na eficiência da asa, os modelos foram simulados novamente em uma seção da cabine ilustrado pelo plano em vermelho na figura 36.

Figura 37 – Modelo de asa com seção da cabine



Fonte: Autor (2023)

O corte da cabine foi aplicado, pois, como descrito na seção 3.1, os recursos computacionais disponíveis não seriam suficientes para realizar a geometria completa, e o autor julgou importante analisar o efeito do teto da cabine no escoamento que incide sobre a asa do caminhão.

A tabela abaixo mostra os dados referentes a simulação dos modelos com a seção da cabine e suas variações da razão Cl/Cd em relação ao escoamento livre nos modelos.

Tabela 7 – Comparativo dos coeficientes utilizando teto na simulação

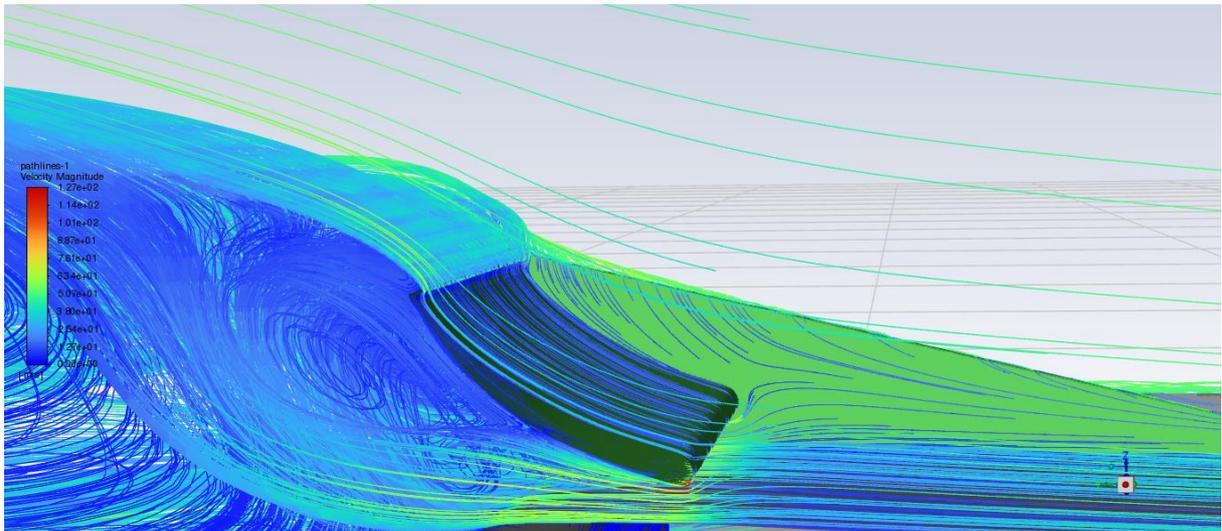
<i>Geometria</i>	<i>Cd</i>	<i>Cl</i>	$ Cl /Cd$	<i>Variação</i>
<i>Asa Referência</i>	0,22	-0,32	1,45	-
<i>Asa Otimizada</i>	0,32	-0,98	3,06	-
<i>Asa Referência + Teto</i>	0,23	-0,38	1,65	13,7%
<i>Asa Otimizada + Teto</i>	0,25	-0,84	3,36	9,8%

Fonte: Autor (2023)

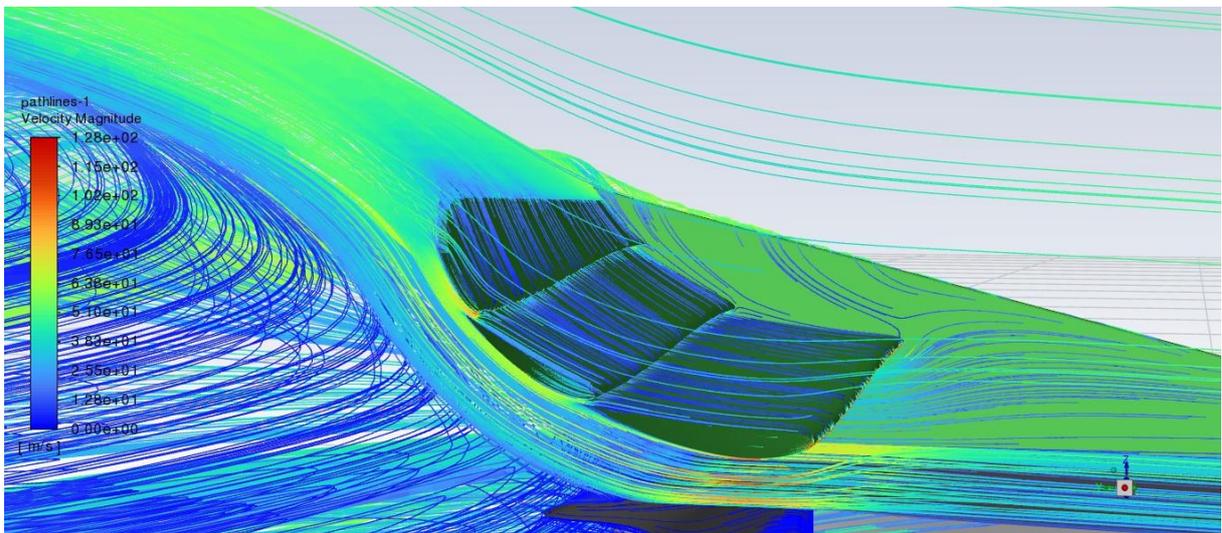
A presença do teto da cabine implicou no aumento da eficiência das asas, gerando mais força descendente em relação ao arrasto gerado. A asa otimizada possui razão Cl/Cd de aproximadamente duas vezes do modelo de referência com a presença do teto.

A diferença entre os escoamentos dos modelos simulados com o teto é ilustrada na figura 37.

Figura 38 – Linhas de corrente dos modelos com teto no plano de simetria



(a) Modelo Referência



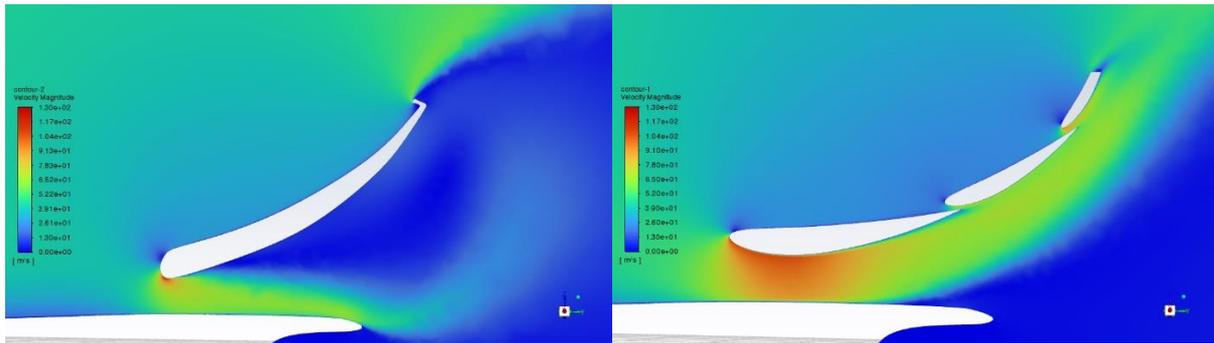
(b) Modelo Otimizado

Fonte: Autor (2023)

Os escoamentos representados por linhas de corrente na figura acima, mostram claramente que a asa segregada em três elementos é capaz de fazer com que o ar permaneça escoando por baixo da asa e não gere uma zona de recirculação próximo à parede.

Para que se possa visualizar melhor a distribuição de velocidade em torno da asa, utiliza-se a representação gráfica na escala de magnitude de velocidade em metros por segundo, sendo esta representação feita no plano de simetria como ilustra a figura 38.

Figura 39 – Campo de velocidade no plano de simetria



(a) Modelo Referência

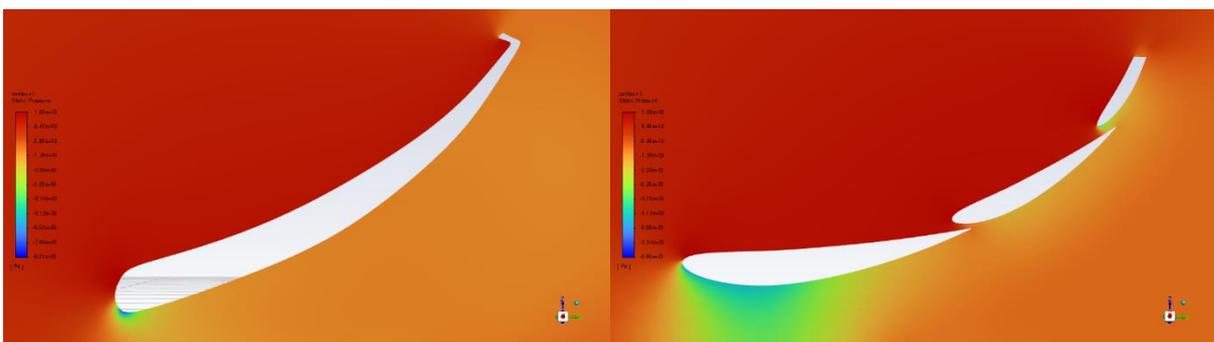
(b) Modelo Otimizado

Fonte: Autor (2023)

A escala utilizada na figura 38 vai de zero a 130 metros por segundo. Como já foi observado pelas linhas de corrente, a imagem acima representa precisamente a distribuição da velocidade ao redor das asas. O modelo referência perde a aderência do escoamento logo após a aceleração do ar na extremidade inferior. O modelo otimizado se utiliza do Princípio de Bernoulli onde o escoamento permanece aderido a superfície inferior da asa e que para respeitar a conservação da massa e sendo esta superfície mais longa que a superior, o fluido acelera, logo, gera um diferencial de pressão adicional por mecanismo viscoso.

Para que se possa observar este fenômeno, plota-se o gráfico da distribuição de pressão nos modelos.

Figura 40 – Campo de pressão no plano de simetria



(a) Modelo Referência

(b) Modelo Otimizado

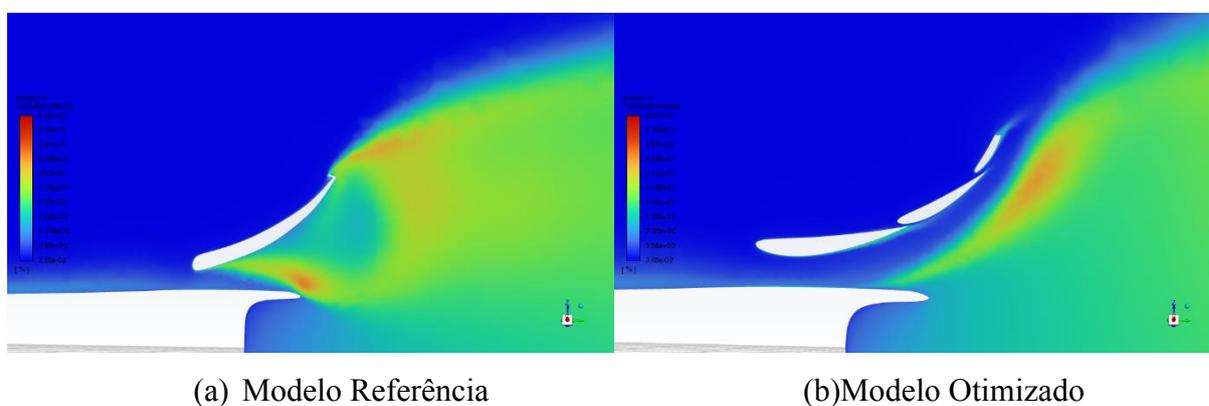
Fonte: Autor (2023)

É ilustrado na figura 39 a diferença entre o campo de pressão no plano simétrico, e ambos modelos estão representados na mesma escala que varia entre -8kPa e 1.6kPa. Esta

diferença na distribuição de pressão entre as asas faz com que a asa otimizada tenha uma relação $|C_l| / C_d$ para este caso aproximadamente 2,32 vezes maior que o modelo referência que hoje é utilizado nas corridas. Visualmente isto é representado pela na figura 39.b com uma porção bem maior na parte inferior tendendo para cores que representam valores menores de pressão, isto indica uma diferença de pressão maior por parte da asa otimizada.

Existe ainda uma representação gráfica interessante que pode se aplicar a este trabalho que é a intensidade de turbulência e esta complementa as figuras 37 e 38. Quando o escoamento descola da asa na fig. 37.a gera-se um campo turbulento atrás da asa e promove perda de eficiência da mesma.

Figura 41 – Intensidade de turbulência no plano de simetria



Fonte: Autor (2023)

As escalas na figura acima variam entre os mesmos valores e estão entre 0,00365% e 35,1% e ilustram a grande geração de turbulência próximo à parede atrás da asa de referência e em contrapartida, a baixa turbulência no modelo otimizado.

Para estimar o impacto global deste aumento de desempenho da asa, foi simulado uma geometria com contornos semelhantes aos do caminhão original, porém, extremamente simplificado, ou seja, sem escoamentos internos, sem detalhes de carenagem, sem cavidades de pneu e roda e sem partes móveis. Esta simplificação pode levar à um erro considerável, principalmente nas forças descendentes, e irá servir apenas com intuito de uma aproximação grosseira da parcela de contribuição da asa nos coeficientes do caminhão, e por isso não será detalhada neste trabalho. Quanto aos resultados desta estimativa, obteve-se o valor de 11% para arrasto e 28% para força descendente no que diz respeito a parcela de contribuição da asa referência para os valores globais do caminhão.

Para que se tenha uma precisão maior da estimativa global, deve-se fazer testes experimentais a fim de obter dados com maior confiabilidade, ou ainda, aumentar o grau de fidelidade na reprodução do modelo real no modelo 3D, porém, como constatado na seção 3.1, não há poder computacional suficiente disponível por parte do autor para que tal nível de fidelidade seja atingido. Contudo, para fins comparativos, esta estimativa será utilizada para analisar o impacto de uma possível mudança da asa referência para a otimizada.

Considerando o uso das equações 8 e 9 nas mesmas condições de escoamentos, ρ e V constantes, mesma área A , tem-se que a variação da força de arrasto e força de sustentação serão diretamente proporcionais a variação dos coeficientes de arrasto e sustentação.

Por fim, a implementação do modelo otimizado da asa no caminhão implicaria em um aumento de 1% no arrasto global e mais de 40% de sustentação negativa global do veículo de corrida.

Para que se possa comparar os resultados, é necessário deixar claro que a aquisição de dados referente a geometria da asa do caminhão, foi específica para a data da aquisição e que mudanças podem ocorrer de acordo com o circuito ou a vontade do piloto ou da equipe.

Figura 42 – Vista lateral do suporte da asa



Fonte: Autor (2023)

5 CONCLUSÃO

A evolução da análise CFD vem ajudando muito a indústria com problemas relacionados a fluidos. Essa ajuda não vem só em questões financeiras, mas também em questões de estrutura e tempo quando comparados a testes experimentais. E no automobilismo nacional ela vem sendo aplicada de forma ainda muito lenta. Por esse motivo, cria-se a necessidade de estudos científicos mais aprofundados para que cada vez mais possamos ver recordes sendo quebrados dentro do esporte. Não só isso, mas também que possa auxiliar na criação de equipamentos e aprimoramentos que muitas vezes saem das pistas para compor o produto no qual fora baseado em sua concepção.

Percebe-se pela figura 41 que a configuração de asa utilizada foi submáxima no que diz respeito à influência da asa no caminhão, logo, esta configuração foi a capturada pelo escâner 3D na aquisição de dados para a modelagem, conforme demonstra figura 18.

O objetivo inicial do estudo era analisar o escoamento como um todo no caminhão (figura 19), porém, como descrito na seção 3.1, o número de elementos necessários para tal seria demasiado e ultrapassaria o limite superior de memória RAM disponível para fazer o estudo.

O estudo envolvendo apenas a asa se deu de maneira a replicar as condições reais de pista e utilizando velocidade próxima a máxima atingida nas pistas (180 km/h), onde a influência das forças geradas pela asa são maiores.

As estimativas de arrasto e sustentação obtidas para a asa padrão e para o modelo de asa otimizada proposto inspirado em um formula 1 são apresentadas na tabela 7, bem como a diferença entre elas e o impacto global que supostamente a mudança de asa teria nos valores globais dos mesmos coeficientes.

A asa otimizada teve um aumento de 8,7% no arrasto ao compará-la com a asa padrão e, sendo 11% a contribuição da asa no arrasto total do caminhão, isto representa um aumento de 0.84% do arrasto global do veículo.

A sustentação teve um aumento de 121% no mesmo comparativo, e, a contribuição da sustentação local da asa para a global do caminhão é de 28%, ou seja, a mudança de geometria representa um aumento de 18,23% de sustentação negativa para o veículo.

A relação de sustentação por arrasto indica a capacidade de gerar forças descendentes por unidade de força de arrasto, como um parâmetro de eficiência, uma vez que o arrasto não é

desejado neste caso. A geometria otimizada apresenta mais que o dobro de força de sustentação gerada por unidade de arrasto, provando ser uma asa muito mais eficiente no comparativo.

A razão para o aumento da eficiência da asa se dá pelo arranjo multi elementos e cada elemento se baseando em perfis NACA, sendo a diferença do comportamento do escoamento entre os modelos discutidos no capítulo 4. Isto causa uma mudança no perfil de obtenção de forças por parte da geometria, sendo que, na asa referência incide majoritariamente o arrasto por pressão, e na asa otimizada, cresce a parcela do arrasto viscoso e diminui o arrasto por pressão. Este fenômeno é facilmente notado nas figuras 37 a 40 e indicam um melhor controle no escoamento e fazendo com que a camada limite não descole na ponta frontal da asa.

Para um estudo futuro, seria interessante verificar o impacto de uma otimização no suporte que mantém a asa afixada ao teto do caminhão. Na figura 37 é possível notar uma geração de vorticidade na aresta do suporte. Seria interessante também executar simulações com escoamentos com incidência angular a fim de analisar a eficiência destes suportes laterais alongados.

REFERÊNCIAS

- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M.. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3. ed. New York: Mcgraw-hill, 2006. 929 p.
- CFD ONLINE. (2011). Law of the wall. Disponível em: https://www.cfd-online.com/wiki/Law_of_the_Wall. Acessado em: 10 de novembro de 2023.
- FOX, Robert W. et al. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2010. 710 p. Tradução de Ricardo Nicolau Nassar Koury.
- GILLESPIE, T. D. (1992). **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: Society of Automotive Engineers, ISBN 1-56091-199-9.
- HUCHO, Wolf-heinrich. **Aerodynamics of road vehicles**. Würzburg: Vogel-verlag, 1987. 566 p.
- MAHEN, Mahendram. Applications of Finite Element Analysis in Structural Engineering. **Proceedings International Conference On Computer Aided Engineering**. Chennai, p. 38-46. 2007.
- MENTER, F. R. **Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications**. AIAA Journal, Vol. 32, No. 8, August 1994, pp. 1598-1605.
- MUSON, Bruce R. et al. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2004. 571 p. Tradução de Euryale de Jesus Zerbini.
- LANFRIT, Marco. **Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT**. Version 1.2. Fluent Deutschland GmbH, Birkenweg 14a. Darmstadt, Germany. 2005.
- LI, D. **Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics**. 1st Edition. Springer, 2008
- RADE, Domingos Alves. **MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADOS A ENGENHARIA MECÂNICA**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- SALTZMAN, E.J. and MEYER, R.R., Jr. (1999) **A Reassessment of Heavy-Duty Truck Aerodynamic Design Features and Priorities**, NASA/TP-1999-206574, Dryden Flight Research Center, disponível em http://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88628main_H-2283.pdf.
- WHITE, Frank M. **Fluid Mechanics**. 7. ed. New York: Mcgraw-hill, 2011. 862 p.