

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COEME – COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

CARLOS EDUARDO MAIA

**ANÁLISE AERODINÂMICA DA CARENAGEM DE UM VEÍCULO DE
EFICIÊNCIA PROJETADA PARA A COMPETIÇÃO SHELL
ECO-MARATHON**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2021

CARLOS EDUARDO MAIA

**ANÁLISE AERODINÂMICA DA CARENAGEM DE UM VEÍCULO DE
EFICIÊNCIA PROJETADA PARA A COMPETIÇÃO SHELL
ECO-MARATHON**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Guarapuava, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado de Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Aldo Przybysz

Coorientadora: Prof. Dra. Raquel da Cunha Ribeiro da Silva

GUARAPUAVA

2021

MAIA, Carlos Eduardo

Análise Aerodinâmica da carenagem de um veículo de eficiência projetada para a competição Shell Eco-Marathon / Carlos Eduardo Maia.

Guarapuava. UTFPR, 2021

40 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof. MsC Aldo Przybysz;

Coorientadora: Prof. Dra. Raquel Da Cunha Ribeiro da Silva

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Engenharia Mecânica. Guarapuava, 2021.

Bibliografia: f. 51.

1. Engenharia. 2. Simulação 3. CFD. I. PRZYBYSZ, Aldo, orient.; SILVA, Raquel da Cunha Ribeiro, coorient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Engenharia Mecânica. IV. Bacharelado.

CDD: 630



TERMO DE APROVAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

Análise Aerodinâmica da carenagem de um veículo de eficiência projetado para a competição Shell Eco-Marathon

Por

Carlos Eduardo Maia

Este trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná, na data 10 de maio de 2021, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora Composta pelos professores abaixo assinados.

MsC. Aldo Przybysz
(Professor Orientador)

Dr. Renan Manozzo Galante
(Membro da banca)

Dr. Sérgio Dalmás
(Membro da banca)

MsC. Aldo Przybysz
(Coordenador do curso de Eng. Mecânica)

- O Termo de Aprovação consta na Coordenação do curso -

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que me apoiaram, familiares e amigos, e também alguns professores. Aos meus pais e irmãos, por todo apoio, principalmente por ter que morar sozinho em outra cidade, distante fisicamente de todos eles, e apenas com o apoio e a força deles acreditando em mim que consegui chegar aonde cheguei, e aos meus amigos, por toda ajuda durante a graduação, àqueles os quais dividi moradia, àqueles que conheci nos projetos.

Agradeço ao PRO-ENEM, que apesar de ter foco no ensino médio, um curso voluntário, me proporcionou uma jornada de autoconhecimento, melhorando minhas habilidades de comunicação e raciocínio consideravelmente, me dando a oportunidade de ser um professor e respeitar ainda mais a profissão. Agradeço também a minha professora Raquel, que me apoiou e orientou desde a primeira ideia desse TCC, e ao professor Aldo, que ajudou a desenvolver a pesquisa nos laboratórios da UTFPR – GP. Gostaria de agradecer a toda equipe do DEPED do *campus* Guarapuava, por prestarem todo o suporte pedagógico e psicológico. Por fim, agradecer à equipe UTECO, que me proporcionou as experiências que nunca teria apenas dentro de sala de aula. Onde aprendi tanto como planejar, gerir, projetar e construir, todas as fases de um projeto de engenharia, e além de tudo, poder ver resultado do esforço conjunto em uma competição internacional.

Sozinho, seria impossível chegar onde cheguei, alguns professores apoiaram, foram verdadeiros mentores não apenas para o mundo da engenharia, mas para a vida como um todo, e ajudando em diversas escolhas que fiz e que farei. Amigos foram importantes não apenas para distrair a mente em momentos de descanso, mas para ajudar em projetos pessoais e profissionais, nos quais podemos ter novas ideias de como agir. São amizades que somam em nossas vidas, muitas vezes são amizades recentes, que criam os caminhos para a nossa saúde mental, contribuindo para a força de vontade de concluir um curso que é muito difícil, porém incrível. E claro, a família, pais e irmãos principalmente, que sempre estiveram ao meu lado, em todos os momentos. A todos vocês, o meu muito obrigado!

"O cientista descobre o que já existe, enquanto o engenheiro cria o que nunca existiu." Theodore von Kármán

RESUMO

MAIA, Carlos Eduardo. Análise Aerodinâmica de Veículo de Eficiência voltado para a competição Shell Eco-Marathon. 51 f. TCC (Curso de Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Guarapuava, 2021.

Uma das características que influencia no consumo de energia é o projeto aerodinâmico da carenagem. O principal objetivo desse trabalho consiste na análise aerodinâmica de três modelos de veículos, afim de definir qual será construído pela UTECO para a Shell Eco-Marathon, uma competição que desafia estudantes de todo o mundo a construir um veículo de alta eficiência energética. O coeficiente de arrasto foi o parâmetro para a escolha do modelo a ser construído, e foi encontrado a partir de uma análise CFD com o software ANSYS. Para simular as condições, os resultados foram baseados nas equações Reynolds aproximadas de Navier-Stokes e o modelo turbulento κ - ϵ , e então escolhido o modelo com 0,09999 de coeficiente de arrasto, o menor entre os três modelos.

Palavras-chave: Simulação. Arrasto. CFD.

ABSTRACT

MAIA, Carlos Eduardo. Aerodynamic Analysis of an efficiency vehicle built for the competition Shell Eco-Marathon. 51 f. TCC (Course of Mechanical Engineering) - Federal University of Technology – Paraná (UTFPR). Guarapuava, 2021.

The Shell Eco-marathon is a competition that challenges students around the world to make a High Efficiency vehicle. One of the characteristics that influences the energy consumption is the body's aerodynamic project. The main objective of this work is to analyze three different models of vehicles, to better guide the UTECO team of The Federal University of Technology – Paraná, Guarapuava Campus, so the team can partake the competition Shell Eco-Marathon, that challenges students around the world to make a High Efficiency vehicle. The drag coefficient was used as a parameter to choose the body for construction, and was obtained using CFD with the software ANSYS. To simulate the conditions, the results were based on the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations and the turbulent model k- ϵ , and then the model with the drag coefficient of 0,09999, the lowest of the three, was chosen.

Keywords: Simulation. Drag. CFD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Equipe UTECO na Shell Eco-Marathon nas edições de (a) 2018 e (b) 2019.	6
Figura 2 – escoamento de um fluido sobre placa plana (ao centro) com regiões de escoamento viscoso (próximo à placa) e não viscoso (afastados da placa).	10
Figura 3. Camada Limite.....	13
Figura 4 – Transição da camada-limite.	13
Figura 5 – Área projetada normal ao escoamento.	15
Figura 6 – Variação do perfil de velocidades sobre um corpo sólido.	16
Figura 7 – Descontinuidade das linhas de corrente.	17
Figura 8 – Formação de vórtices.	17
Figura 9 – Deslocamento da camada limite $Re \geq 3 \times 10^5$	18
Figura 10 – Consumo em função do CD	19
Figura 11 – Força e momentos atuantes no deslocamento de veículos.....	20
Figura 12 – Domínio computacional com uma célula, um pequeno elemento do domínio. Em (a) um domínio bidimensional e em (b) um domínio tridimensional.	21
Figura 13 - Chassi da equipe UTECO para a edição 2020, renderizada no Autodesk Inventor 2018. Em (a) tem-se a vista lateral com a medida de comprimento; em (b) a vista frontal com as medidas de altura, de largura do chassi e da projeção do espaço entre as rodas; em (c) a forma renderizada isométrica do chassi, em alumínio.	24
Figura 14 – Veículos usados como base para os Modelos 2 e 3. (a) BYU Supermileage ($CD = 0.107$); (b) Si Pitung G4 ($CD = 0.13$); (c) Eco-Arrow ($CD = 0.096$); Pac-Car II ($CD = 0.075$).	25
Figura 15 – Modelo 1.....	25
Figura 16 – Modelo 2.....	26
Figura 17 – Modelo 3.....	26
Figura 18 – Mesa de trabalho do ANSYS com o Modelo 1 (A), 2 (B) e 3 (C).....	27
Figura 19 – Dimensões do volume de Controle e Seções relevantes.	28
Figura 20 – Fluxograma da ordem de cálculos a serem feitos.	30

Figura 21 – Malha do Modelo 1.....	31
Figura 22 – Malha do Modelo 2.....	31
Figura 23 – Malha do Modelo 3.....	32
Figura 24 – Gráficos de convergência do Coeficiente de Arrasto dos modelos 1 (a), 2 (b) e 3 (c) (C_d X Número de Iterações).....	33
Figura 25 – Pressão total nos modelos 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	34
Figura 26 – Linhas de escoamento dos modelos 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	35
Figura 27 – Modelo 3 finalizado.	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos modelos desenhados para análise.	23
Tabela 2 – Condições de contorno comuns a ambos os modelos.	29
Tabela 3 – Condições de contorno singulares a cada modelo.	29
Tabela 4 – Coeficientes de arrasto dos modelos.	36

LISTA DE ABREVIATURAS

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
SEM	Shell Eco-Marathon
CFD	Fluidodinâmica Computacional (<i>Computational Fluid Dynamic</i>)
CAD	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer Assisted Design</i>)
RANS	Média de Reynolds de Navier-Stokes (<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade do fluido [kg/m ³]
μ	Viscosidade Dinâmica [N.s/ m ²]
μ_T	Viscosidade Turbulenta [m ² /s]
ν	Viscosidade Cinemática [m ² /s]
δ	Espessura da camada limite [m]
Ma	Número de Mach
Re	Número de Reynolds
V	Velocidade de escoamento do fluido [m/s]
u_∞	Velocidade de corrente livre
F_D	Força de Arrasto [N]
C_D	Coefficiente de Arrasto

Sumário

1 INTRODUÇÃO	6
1.1 OBJETIVO	7
1.1.1 Objetivos Específicos	7
1.2 JUSTIFICATIVA.....	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	9
2.1 BREVE HISTÓRICO DA MECÂNICA DOS FLUIDOS	9
2.2 ESCOAMENTO	10
2.2.1 escoamento Viscoso e Não Viscoso	10
2.2.2 escoamento Compressível e Incompressível.....	11
2.2.3 escoamento Laminar e Turbulento.....	11
2.3 NÚMERO DE REYNOLDS	12
2.4 CAMADA LIMITE.....	12
2.5 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES	14
2.6 ARRASTO	15
2.7 AERODINÂMICA.....	16
2.7.1 Aerodinâmica Veicular.....	18
2.8 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	20
2.8.1 Modelo de turbulência Standard $k - \epsilon$	22
3 METODOLOGIA	23
3.1 PREPARAÇÃO DOS MODELOS CAD	23
3.2 PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE EM CFD.....	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31

	5
5 CONCLUSÕES	38
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39

1 INTRODUÇÃO

Uma das maiores discussões da atualidade é a questão ambiental, e dentre essas preocupações, a diminuição da emissão de gases de efeito estufa provenientes de combustíveis fósseis, além da questão econômica tem feito os usuários buscarem veículos com maior autonomia. Diversos fatores influenciam no consumo de combustível, e um desses fatores é a aerodinâmica de um veículo, haja vista que a influência no escoamento de ar afeta o movimento dos veículos. Ou seja, é preciso desenvolver um veículo cuja aerodinâmica seja o mais otimizada possível para reduzir o consumo de combustível.

Atualmente, diversas empresas investem no desenvolvimento de novas tecnologias nessa área, e uma delas é a Shell, que organiza a competição de eficiência energética Shell Eco-Marathon. Existem duas categorias principais, a “Protótipo”, cujo objetivo é apenas minimizar o consumo de combustível, com desenhos otimizados para máxima performance e a categoria “Conceito Urbano”, na qual além do objetivo principal de eficiência energética, precisa ser um veículo similar aos veículos de passeio atuais, contendo dois assentos, faróis, portas laterais, obrigatoriamente 4 rodas, entre outros atributos. Dentro dessas duas categorias majoritárias existem as subcategorias que se dividem de acordo com o tipo de energia utilizada, como gasolina, elétrica e etanol (SHELL ECO-MARATHON, 2020).

A equipe UTECO – Veículo de alta eficiência energética (UTECO), é um projeto de extensão criado em 2017 na Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Guarapuava (UTFPR-GP), e já competiu nas edições de 2018 e 2019, na categoria Protótipo a gasolina, sendo que em 2019 conquistou a quarta colocação. A Figura 1 é da equipe nas edições de 2018 e 2019.

Figura 1 – Equipe UTECO na Shell Eco-Marathon nas edições de (a) 2018 e (b) 2019.



Fonte: Autoria própria.

O arrasto que o ar exerce sobre um corpo, influencia diretamente no valor da energia necessária para que o mesmo permaneça em movimento, já que a força de arrasto é proporcional à velocidade ao quadrado, como é possível observar no capítulo 2 deste trabalho. (HALL, 2015)

Devido a essa característica da força de arrasto, que atua na direção oposta ao veículo, é possível buscar uma melhoria no consumo de combustível através da redução da força de arrasto de um veículo (SIVARAJ; PARAMMASIVAM; SUGANYA, 2018). Portanto é preciso analisar uma geometria que permita que o escoamento desse fluido seja o melhor possível.

Com a ciência disso, foi desenvolvido um chassi com softwares de Desenho Assistido por Computador (CAD), e por cima deste chassi, desenhou-se a carenagem, buscando assim um formato que proporcionasse menor coeficiente de arrasto. Utilizando recursos de Mecânica dos Fluidos Computacional (CFD), foi então feita uma análise sobre o coeficiente de arrasto de algumas geometrias, para então definir qual modelo de carenagem seria fabricado e utilizado pela UTECO. Vale ressaltar que o design otimizado fica restrito apenas à carenagem, e não é permitido, pelo regulamento da competição, ter apêndices, como spoilers ou asas, que afetem a aerodinâmica do veículo.

Este trabalho abordará alguns conceitos de mecânica dos fluidos e os processos que serão utilizados no software ANSYS, para realizar a comparação entre os modelos e os resultados obtidos após a análise em CFD. Por fim, será definido qual dos modelos projetados será o mais recomendado para a construção.

1.1 OBJETIVO

Realizar um estudo na aerodinâmica veicular da carenagem do protótipo da UTECO em CFD, realizando a modelagem 3D em CAD e as simulações no software ANSYS, para encontrar o coeficiente de arrasto dos modelos desenhados.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Projetar três modelos 3D em CAD para simulação;
- Coletar uma amostra de dados para determinar o coeficiente de arrasto dos modelos;

- Comparar os modelos e determinar qual será fabricado, de acordo com o menor coeficiente de arrasto.

1.2 JUSTIFICATIVA

Durante o desenvolvimento do veículo de 2019, um dos aspectos que foram considerados foi a aerodinâmica. Como um dos fatores que afeta o consumo de combustível, foi preciso desenvolver um veículo que oferecesse menor resistência ao movimento possível, e para isso foi desenvolvido um estudo estimado de um coeficiente de arrasto. Ao realizar tal estudo percebeu-se a necessidade em aprofundá-lo, pois foi necessário aplicar diversos conhecimentos em mecânica dos fluidos.

Além disso, os projetos de extensão são formados por alunos da universidade, e devido à efemeridade dos membros no projeto, para que o projeto continue crescendo e prosperando, é importante a perpetuação do conhecimento. Então este trabalho pode ser utilizado como material de consulta, tanto para futuros membros da equipe UTECO quanto para outras equipes que desejam trabalhar com aerodinâmica veicular.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Há muito é estudado o comportamento de corpos, estejam eles em movimento ou não, e isso, de modo geral, é tratado na mecânica, nas áreas: dinâmica e estática. Quando se trata de fluidos, e como eles interagem com o meio ao redor, a área responsável pelo estudo dos mesmos é a mecânica dos fluidos. Nela, são analisados líquidos e gases, e é uma área que, por sua vez, se divide em algumas categorias, como a hidrodinâmica, que lida com escoamento de fluidos incompressíveis, e a aerodinâmica, que trata os assuntos relacionados ao escoamento de gases sobre superfícies (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

2.1 BREVE HISTÓRICO DA MECÂNICA DOS FLUIDOS

Existem diversas evidências de que povos do passado lidaram com fluidos, e observou-se muito isso em abastecimento de água e irrigação para plantações, e os aquedutos romanos são exemplos disso. Há também registros por volta de 283 a 133 a.C., da cidade de Pergamon, atual Turquia, onde foram construídas tubulações que aumentavam a pressão a mais de 1,7 MPa. Já na Idade Média até à Primeira Revolução Industrial, foram criadas diversas bombas d'água com pistão, além de moinhos, que utilizavam o curso dos rios para moagem de grãos, além de sistemas de irrigações criados pelos povos pré-colombianos, tecnologias não vistas na Europa (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Foi na Renascença que o método científico para o estudo de fluidos começou a se desenvolver, até culminar no tratado de Bernoulli, de 1738, *Hydrodynamic*, considerado o primeiro texto sobre mecânica dos fluidos. A mecânica dos fluidos acabou não avançando muito por um longo período, e não teve tanto impacto na engenharia como um todo, mas a partir do século XIX teve avanços consideráveis. Diversos cientistas contribuíram para o avanço na área a nessa época, dos quais vale citar o alemão Gotthilf Hagen (1797 – 1884) que diferenciou escoamento laminar e turbulento, Lord Osborne Reynolds (1842 – 1912), que se baseou no anterior e criou um número adimensional para definir melhor os dois conceitos, o Número de Reynolds, George Stokes (1819 – 1903) que concluiu o trabalho de Louis Navier (1785 – 1836), definindo as equações de movimento com atrito para fluidos, as equações de Navier-Stokes, e

então Ludwig Prandtl (1875 – 1953) que definiu os conceitos iniciais sobre camada-limite (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Diversas tecnologias nasceram do estudo teórico conduzido por esses cientistas, como por exemplo a invenção do avião, e com as duas grandes guerras que ocorreram no século XX, somadas à Guerra Fria, houve um avanço exponencial na tecnologia como um todo, e isto também se aplica à Mecânica dos Fluidos.

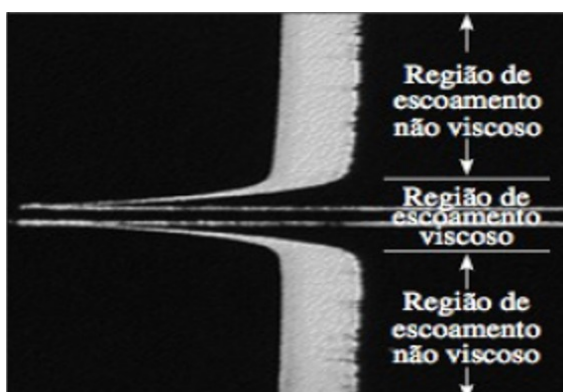
2.2 ESCOAMENTO

O movimento de fluidos em relação a sólidos ou a outros fluidos é a parte da mecânica dos fluidos denominada escoamento. Existem classificações diferentes para os tipos de escoamento, tratados a seguir.

2.2.1 Escoamento Viscoso e Não Viscoso

Quando um fluido se movimento sobre uma superfície, há uma força de atrito aplicada entre as camadas. Essa força tende a dificultar o movimento do mesmo, e é uma medida ligada à viscosidade do fluido. Apesar de todo fluido possuir viscosidade, em diversos casos a resistência ao movimento é desprezível. Caso seja relevante a viscosidade do fluido, é classificado com escoamento viscoso (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Figura 2 – Escoamento de um fluido sobre placa plana (ao centro) com regiões de escoamento viscoso (próximo à placa) e não viscoso (afastados da placa).



Fonte: Çengel; Cimbala (2015)

Na Figura 2 é possível observar o motivo de desconsiderar a viscosidade em algumas situações. Enquanto próximo à placa, o fluido se agarra a placa, o que impede o movimento contínuo, nas regiões mais afastadas, isso não ocorre. Apesar de haver viscosidade no fluido, não influencia consideravelmente o comportamento da correnteza (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

2.2.2 Escoamento Compressível e Incompressível

A compressibilidade do escoamento está ligada à massa específica de uma partícula de fluido. Diz-se que um fluido é incompressível se a massa específica é constante enquanto ele se move. Em outras palavras, um escoamento é dito incompressível se essa grandeza se mantiver aproximadamente constante ao longo do movimento do fluido (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Para determinar a compressibilidade de um fluido utiliza-se o número de Mach, que é:

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (1)$$

Sendo V a velocidade de escoamento do fluido e c a velocidade do som no meio, e se $Ma < 0,3$, o fluido é incompressível. Para melhor compreensão, a nível do mar, a velocidade do escoamento de ar atmosférico para que seja incompressível, dado que c é aproximadamente 340 m/s, é de cerca de 102 m/s ou 367,2 km/h (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

2.2.3 Escoamento Laminar e Turbulento

Em escoamentos viscosos encontra-se o escoamento laminar e turbulento, no qual o turbulento difere à medida que há um deslocamento da camada-limite, e as partículas do fluido se comportam aleatoriamente, se misturando ainda mais entre si. Nesse tipo é preciso avaliar as mudanças de velocidade e pressão que ocorrem na região turbulenta, pois é algo que afeta diretamente o movimento de um corpo. Já o escoamento laminar, é um escoamento mais suave, no qual a mistura entre partículas é mínima, e o fato de ser mais estável resulta e menos mudanças na maneira pela qual o fluido escoar sobre uma superfície (POTTER; WIGGERT, 2018).

É algo que parece subjetivo, porém, como citado anteriormente, o número de Reynolds é algo que permite estimar se o escoamento é laminar ou turbulento, o que é crucial para análises em escoamento.

2.3 NÚMERO DE REYNOLDS

Existem diversos fatores que acarretam numa transição entre escoamento laminar e turbulento, como geometria, rugosidade, velocidade e pressão. Em 1880 Lorde Osborne Reynolds encontrou que a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas era o que indicava a transição. Essa razão foi definida como o número de Reynolds. Esse é um número adimensional que indica justamente em que regime está o fluido de acordo com os dados previamente estabelecidos ou coletados, sendo que valores baixos indicam baixa viscosidade e também, que valores mais altos indicam que ocorre turbulência. Para escoamento externo, pode ser definido por:

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2)$$

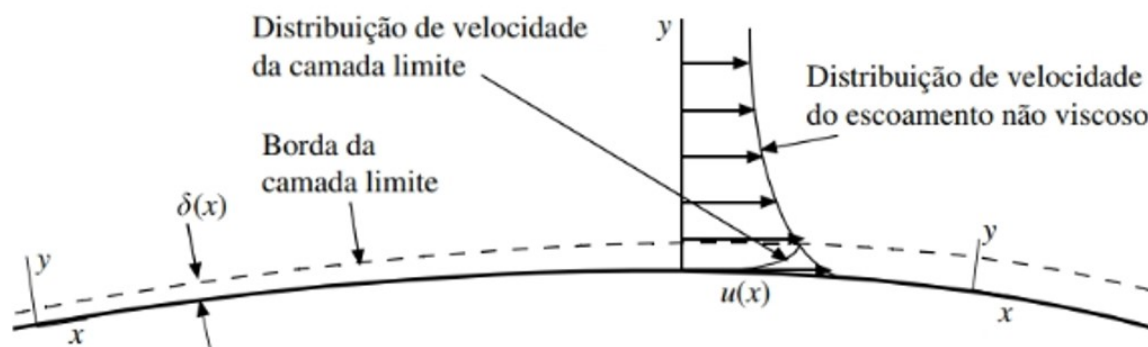
Sendo ρ a densidade do fluido, L o comprimento aproximado ao de uma placa plana, pelo qual escoo paralelamente, e μ a viscosidade dinâmica do fluido (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

2.4 CAMADA LIMITE

Quando um fluido escoo por uma superfície, como citado anteriormente, há uma região em que o fluido atua como não viscoso, pois a viscosidade não é significativa para análise, mas a região em que essa propriedade afeta o movimento do mesmo é dentro da camada-limite, que é uma fina camada em que há uma mudança na velocidade de escoamento do fluido. Adjacente à superfície o fluido possui a mesma velocidade da superfície, e essa velocidade aumenta gradativamente até o ponto em que a velocidade do fluido é a mesma da região não viscosa. Como não há divisões físicas, é estabelecido que a camada-limite é a região, com espessura $\Delta(x)$ em que o fluido escoo com velocidade até 99 % inferior à chamada velocidade de corrente

livre do fluido, determinada como x (POTTER; WIGGERT, 2018). A figura 3 mostra um esquema da camada limite.

Figura 3. Camada Limite.



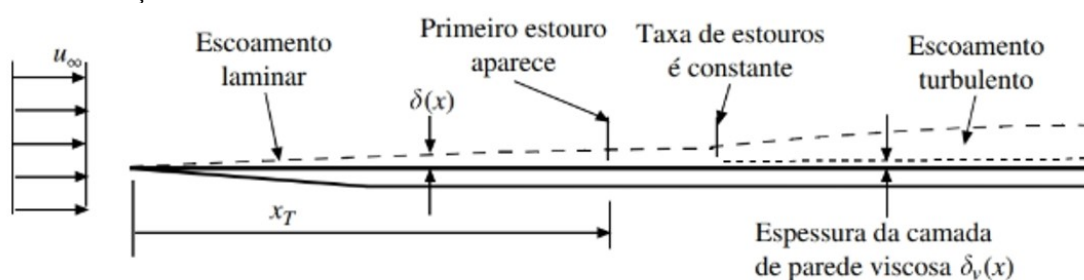
Fonte: (POTTER; WIGGERT, 2018)

É dentro da camada-limite que se estuda os comportamentos laminar e turbulento dos fluidos. Ela é laminar mais próxima do ponto de ataque ou em pontos de estagnação, e se estende até um ponto x_T onde começa a transição para a fase turbulenta, e dada a velocidade de corrente livre, denominada por u_∞ , do fluido e a viscosidade cinemática ν do fluido, é possível obter o número de Reynolds Crítico, que indica esse ponto de transição, com:

$$Re = \frac{u_\infty x_T}{\nu} \quad (3)$$

A transição ocorre em Reynolds entre 3×10^5 e 5×10^5 , número que varia de acordo com a geometria e rugosidade da superfície pela qual o fluido escoava, indo para um regime de transição para turbulência, com um aumento considerável na espessura da camada-limite (ÇEN-GEL; CIMBALA, 2015). A Figura 4 exemplifica como ocorre a transição.

Figura 4 – Transição da camada-limite.



Fonte: (POTTER; WIGGERT, 2018)

2.5 EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

Como citado anteriormente, era muito complexo determinar as variáveis que influenciavam o movimento nos fluidos, até que foram criadas as equações de Navier-Stokes. Com elas, unidas à equação de continuidade diferencial, é possível encontrar as variáveis u , v e w , que correspondem à velocidade escalar em cada eixo cartesiano, e a variável p que representa a pressão devido às tensões que o movimento provoca, desde que se saiba as devidas condições de contorno (POTTER; WIGGERT, 2018).

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right] \quad (4)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right] \quad (5)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right] \quad (6)$$

E sua forma vetorial:

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g} \quad (7)$$

Reynolds ajustou as equações de Navier-Stokes, tornando-as mais práticas para determinadas aplicações, criando as equações Médias-Reynolds de Navier-Stokes (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* ou RANS). Que utilizam as equações de Navier-Stokes combinadas com a equação de conservação da massa:

$$\frac{du}{dx} + \frac{dv}{dy} + \frac{dw}{dz} = 0 \quad (8)$$

Que resultam na equação:

$$\rho g_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{pu^{2'}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{pu'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{pu'w'} \right) = \rho \frac{d\bar{u}}{dt} \quad (9)$$

Que pode ser utilizada para o desenvolvimento de modelos de turbulência, como o $k - \varepsilon$ (SUCH, 2018).

Apesar de ter facilitado muito na obtenção de novos resultados, equações de Navier-Stokes para regime turbulento não podem ser resolvidas, devido ao comportamento transiente e tridimensional. Seria necessário, determinar todas as componentes de velocidade em cada ponto da região de interesse, e mesmo com uma geometria simples, são dados quase impossíveis

de obter, e por isso, estudos envolvendo essa área são feitos experimentalmente ou realizando simulações.

2.6 ARRASTO

Assim como definido pela terceira lei de Newton, "ação e reação", a viscosidade de um fluido que escoar sobre uma superfície aplica tensões sobre ela. Quando um corpo se movimenta por fluido existe uma força que é contrária ao movimento, que é o arrasto. A equação para se determinar a força de arrasto partiu de um experimento com uma esfera lisa, mas é aplicável para qualquer geometria (FOX et al., 2018). Em linguagem matemática, a sua forma de função seria:

$$F_D = f(d, V, \mu, \rho) \quad (10)$$

Sendo F_D a Força de Arrasto e d o diâmetro da esfera. A Equação 10 é desenvolvida para:

$$\frac{F_D}{\rho V^2 A} = f\left(\frac{\rho V d}{\mu}\right) = f(Re) \quad (11)$$

O número de Reynolds considera a geometria do corpo, e por conseguinte esta é uma equação que pode ser aplicada para qualquer geometria, não apenas uma esfera lisa (FOX et al., 2018). Os dados que levam em conta o número de Reynolds são organizados para definir o Coeficiente de Arrasto (C_D), tal que:

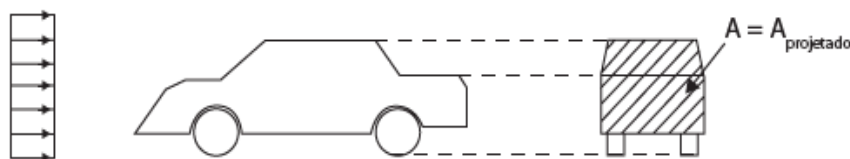
$$C_D = f(Re) \quad (12)$$

O que culmina em:

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho V^2 A_p} \quad (13)$$

Sendo A_p a área projetada (Figura 5), normal à direção do escoamento (FOX et al., 2018).

Figura 5 – Área projetada normal ao escoamento.



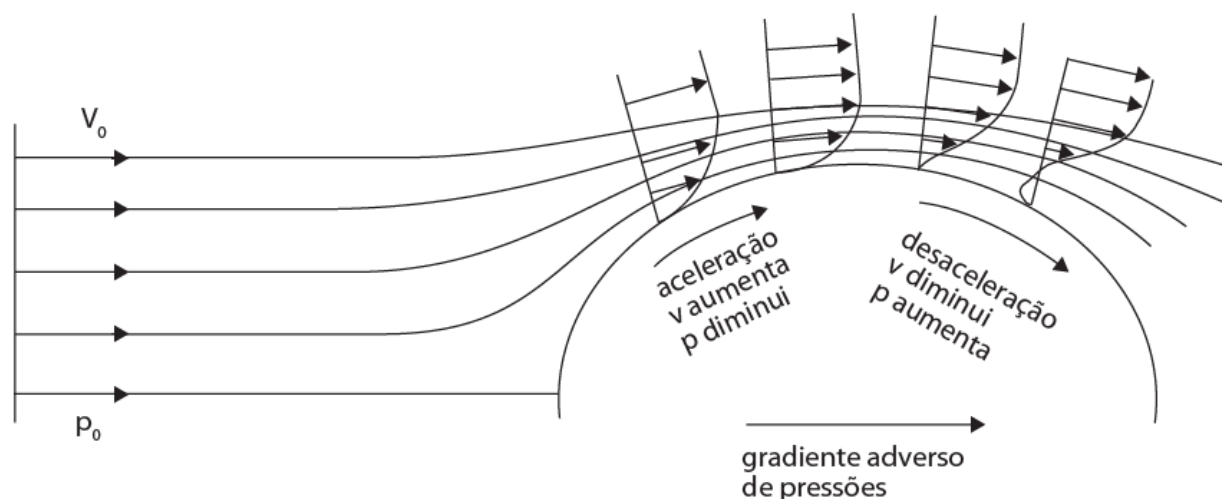
Fonte: (WINDLIN et al., 2012)

2.7 AERODINÂMICA

Propriamente dita, a Aerodinâmica é a área da mecânica dos fluidos que estuda o escoamento de ar. É uma ciência com diversas aplicações na engenharia, e se divide, assim como o escoamento, em Interna e Externa. A aerodinâmica externa envolve não apenas a geometria do corpo, mas os efeitos ao seu redor, como as diferenças de pressão que se aplicam em asas de avião ou até os efeitos das ondas de choque criadas pela quebra da barreira do som por aviões supersônicos (ANDERSON, 2011).

À medida que um fluido escoar por uma superfície não plana ocorrem mudanças na camada-limite. Com as mudanças na geometria, alcança-se uma região do corpo em que a pressão do fluido acaba sendo reduzida, devido ao aumento da velocidade. Essa diminuição de pressão acaba desacelerando o mesmo até um ponto que sua velocidade se torna zero, e teoricamente fica negativa. Esse fenômeno é chamado “deslocamento da camada-limite” (WINDLIN et al., 2012). A Figura 6 ilustra como o perfil de velocidades se comporta.

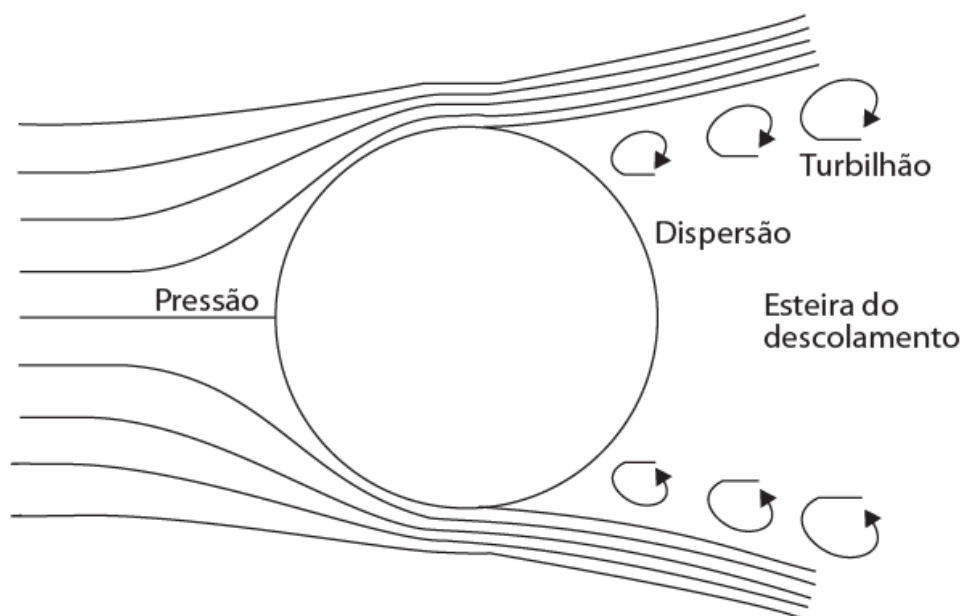
Figura 6 – Variação do perfil de velocidades sobre um corpo sólido.



Fonte: (WINDLIN, 2012)

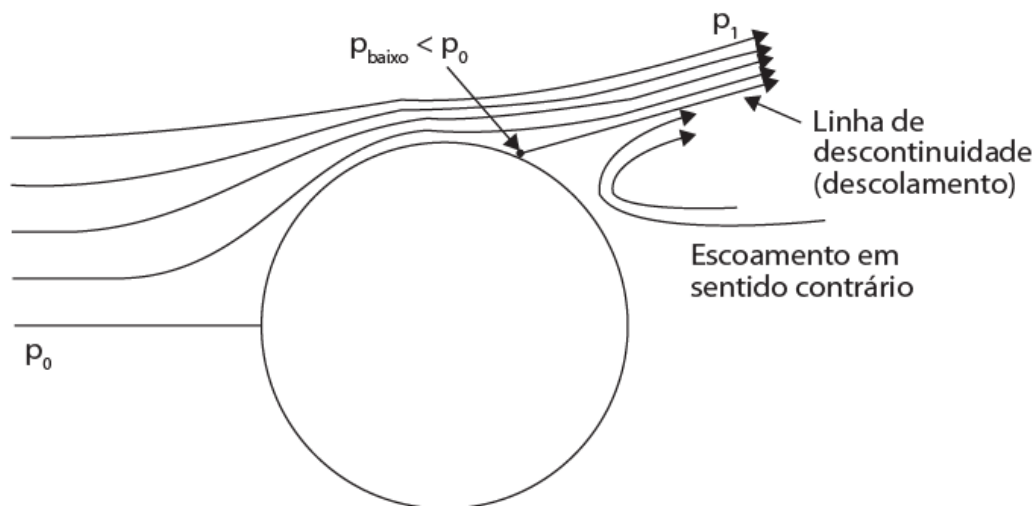
Com isso, há um escoamento no sentido contrário, e as linhas acabam se quebrando e gerando uma rotação, os vórtices, em que há uma redução da velocidade, devido à queda de pressão, o que acaba dificultando o movimento do corpo (WINDLIN, 2012).

Figura 7 – Descontinuidade das linhas de corrente.



Fonte: (WINDLIN, 2012)

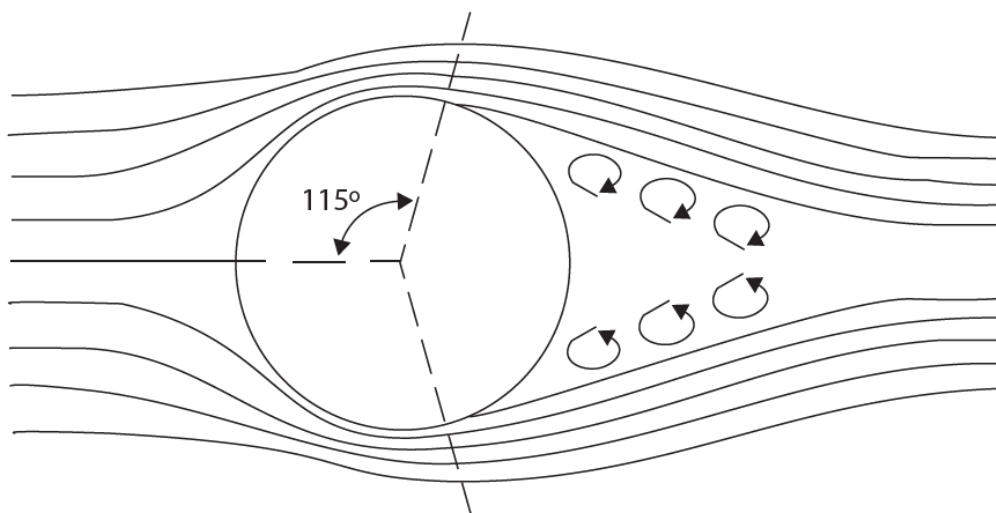
Figura 8 – Formação de vórtices.



Fonte: (WINDLIN, 2012)

O perfil da Figura 8 se assemelha a um escoamento laminar, com $Re \leq 1.000$. A medida que o Reynolds aumenta, e alcança $Re \geq 3 \times 10^5$ o escoamento passa para turbulento, e os movimentos transversais da camada limite turbulenta acabam colocando a camada limite para a parte traseira do corpo, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 – Deslocamento da camada limite $Re \geq 3 \times 10^5$.



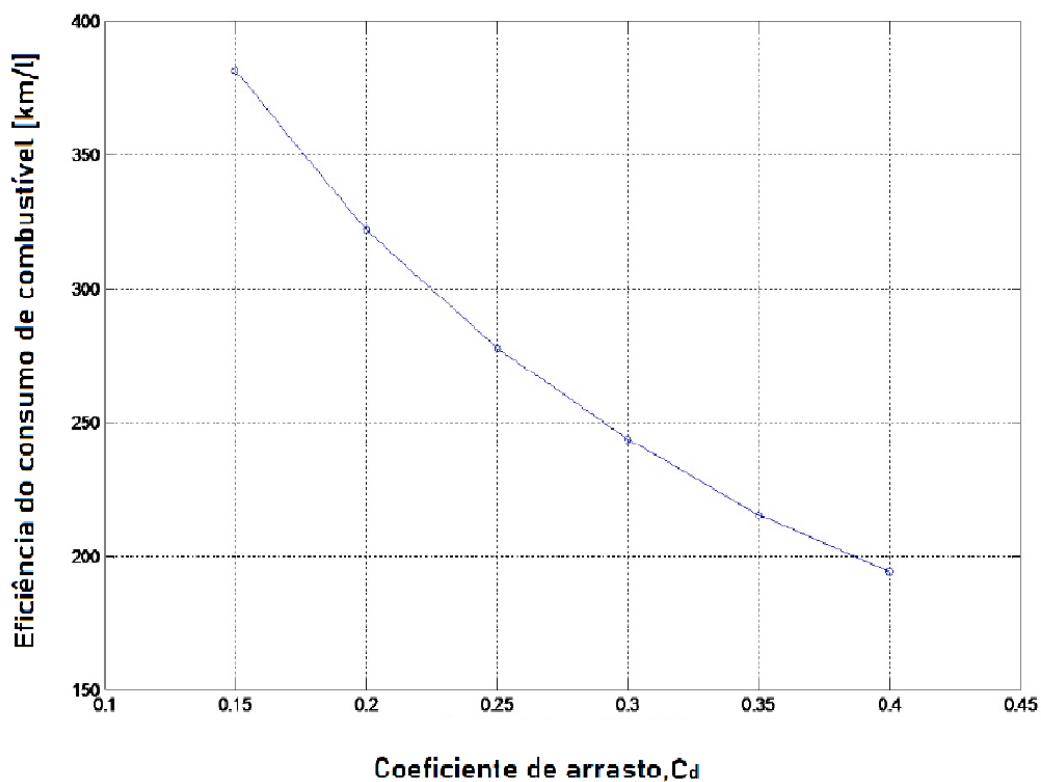
Fonte: (WINDLIN, 2012).

Esse efeito causa uma redução no C_D , e conseqüentemente na F_D , ou seja, é vantajoso um escoamento turbulento dependendo da geometria do corpo. Vale ressaltar que é comum que em baixas velocidades a camada limite já seja turbulenta (WINDLIN, 2012).

2.7.1 Aerodinâmica Veicular

A aerodinâmica veicular tem o foco em melhorar o escoamento em veículos, com o intuito de melhorar a condução do mesmo (melhorando estabilidade, derrapagem, segurança, ...), o funcionamento (deposição de detritos no corpo, barulho, arrefecimento do motor, ...) e também a redução de consumo de combustível (objetivo da equipe UTECO). A análise leva em consideração o escoamento do ar sobre o corpo do veículo, seus componentes (rodas, escapamento, motor) e a região interna do veículo, ou seja, em qualquer lugar que haja escoamento de ar (LAJOS, 2002). O consumo de combustível varia consideravelmente de acordo com o C_D , como se pode ver no exemplo da Figura 10.

Figura 10 – Consumo em função do C_D .

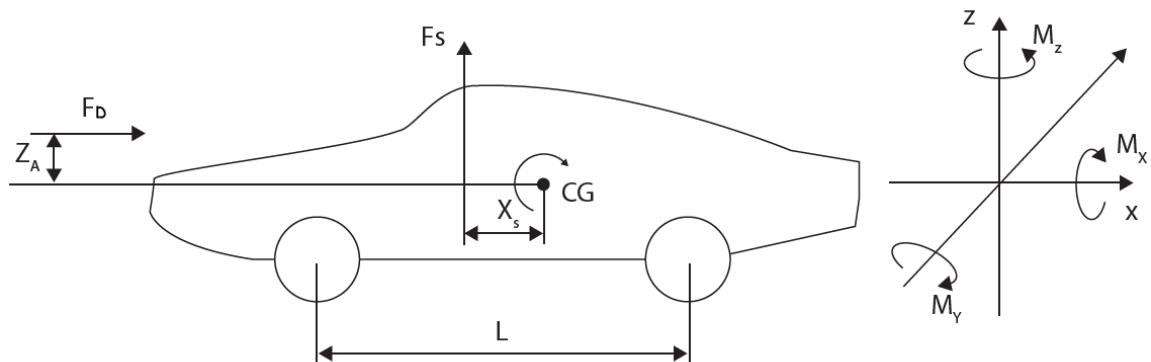


Fonte: (GRUNDITZ; JANSSON, 2009).

A fim de reduzir o consumo de energia gasta para realizar trabalho, tenta-se reduzir o C_D através de mudanças na disposição de componentes do veículo submetidos ao escoamento, e a mudanças no design do mesmo, avaliando os pontos com mais perturbações e realizando mudanças pontuais a fim de reduzir o efeito do escoamento no movimento do veículo (WINDLIN et al., 2012).

Outra força relevante, principalmente para veículos de alta velocidade, é a Força de Sustentação, que atua perpendicular ao movimento, devido às variações de pressão ao longo do corpo. Para aeronaves é uma das principais variáveis, pois é ela que mantém os aviões e helicópteros voando, mas também é importante em carros de corrida, visando mantê-los mais perto do chão, o que os torna mais "aerodinâmicos", e para isso há o uso de aerofólios que realizam uma força contrária à de sustentação (WINDLIN, 2012).

Figura 11 – Força e momentos atuantes no deslocamento de veículos.



Fonte: (WINDLIN et al., 2012).

Assim como a F_D , a Força de Sustentação (F_S) também pode ser calculada:

$$F_S = \frac{C_s(\rho V^2 A p)}{2} \quad (14)$$

Sendo C_s o coeficiente de sustentação. Por ser uma força perpendicular ao arrasto, a força de sustentação não afeta o movimento no eixo x , ou seja, não afeta diretamente na força de arrasto, nem em seu coeficiente.

2.8 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

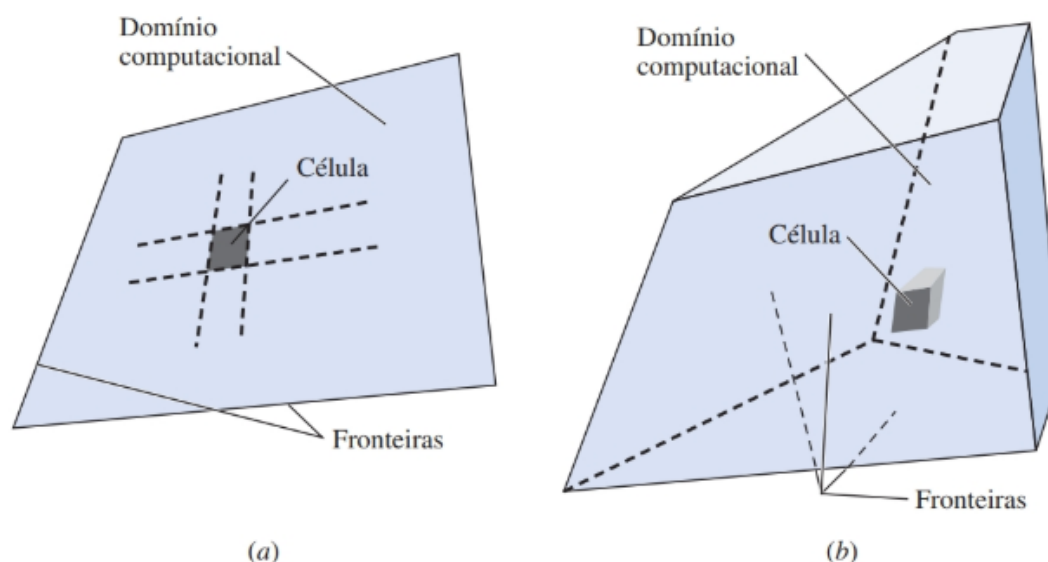
É sabido que diversos fenômenos físicos, para serem calculados, acabam sendo simplificados, para se obter valores numéricos. Porém, em problemas muito complexos de engenharia acaba se tornando inviável fazer aproximações, de modo que o resultado não descreve de fato o fenômeno analisado. Isso acarreta no desenvolvimento de pesquisas experimentais, que descrevem exatamente o que está acontecendo e os dados coletados estão atrelados ao que pode ser observado ou detectado. Contudo são processo que, em sua maioria, tem preço elevado pois é necessária a produção de um protótipo para realização do experimento e de um ambiente controlado (VERGEL, 2013).

Na aerodinâmica um experimento bastante usado é o realizado nos túneis de vento, que consiste em um volume fechado, de tamanho variado em que é aplicado uma corrente artificial de escoamento de ar, e dentro deste espaço há o protótipo que será analisado. Para que simule

uma situação real, o túnel de vento precisa ser grande o suficiente para que as paredes do mesmo não alterem o escoamento de fluido não viscoso, ou seja, deve ser relativamente grande. Por esse fato, muitas vezes se constrói um modelo em escala reduzida, pois como a Figura 10 mostra, o C_D depende do número de Reynolds, e se manteria constante, desde que a geometria não seja alterada. (VERGEL, 2013)

Para contornar o problema prático que é a construção de um ambiente controlado, ou no caso, de um túnel de vento, tem sido cada vez mais feita a análise utilizando fluidodinâmica computacional (do inglês *Computational Fluid Dynamics* – CFD). O cálculo em CFD requer um desenho do modelo que será observado. A geometria a ser analisada, é então integrada a um domínio computacional, e dividida em diversos pequenos volumes de controle, as células. As células aproximam os dados do domínio à realidade, sendo que o ideal seria ter cada célula do tamanho de partículas. Apesar de existir essa possibilidade, quanto menor a célula, maior deverá ser a capacidade de processamento do hardware, e mesmo com computadores de última geração pode-se demorar dias (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). A figura 12 exemplifica um domínio computacional.

Figura 12 – Domínio computacional com uma célula, um pequeno elemento do domínio. Em (a) um domínio bidimensional e em (b) um domínio tridimensional.



Fonte: (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Além da criação do domínio, é então inserido as condições de contorno para realização dos cálculos. O método utilizado por softwares é o método numérico, utilizando valores

arbitrários inicialmente e então, através de diversas iterações convergir para valores próximos dos reais. As condições a serem consideradas são: propriedades do fluido (pressão atmosférica, densidade, viscosidade, temperatura, velocidade de escoamento, denominação das partes do volume de controle (entrada e saída de escoamento, paredes e corpo) e o modelo de solução a ser utilizado.

Como citado anteriormente, resultados laminares são raramente utilizados em cálculos de engenharia, e para análises em CFD, ao lidar com a camada limite turbulenta é preciso definir um modelo de turbulência. Devido à dificuldade em definir os parâmetros na turbulência para aplicar nas equações de Navier-Stokes, alguns modelos matemáticos fazem algumas considerações e substituem as equações pela Média de Reynolds de Navier-Stokes (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes* ou RANS). Dentre os modelos mais conhecidos, existem o $k - \varepsilon$, o $k - \omega$ e $q - \omega$, que são os chamados “modelos de turbulência de duas equações”, que adicionam mais duas equações de transporte, o que faz com que sejam necessárias mais duas condições de contorno (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

2.8.1 Modelo de turbulência Standard $k - \varepsilon$

Segundo Çengel e Cimbala (2015), este é um modelo que leva em consideração a Energia Cinética Turbulenta (k) e a “taxa de dissipação de energia cinética turbulenta” (ε). Como são dados de difícil acesso, acabam sendo feitas aproximações iniciais de seus valores, extrapolando os dados, e então com iterações do método numérico encontrar o valor próximo do real.

Apesar dos modelos de turbulência serem aproximações, o modelo $k - \varepsilon$ é um dos mais utilizados devido à sua estabilidade numérica, e é aplicável em diversas faixas de turbulência, e por essa razão, foi o escolhido para a realização deste trabalho. Os valores de k e ε , são determinados a partir das equações de transporte, e podem ser utilizados para determinar a viscosidade turbulenta μ_t do fluido (VERGEL, 2013).

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (15)$$

Sendo C_μ um coeficiente obtido experimentalmente (VERGEL, 2013).

3 METODOLOGIA

Para realização da análise do protótipo da UTECO, é preciso estabelecer os parâmetros para a criação dos modelos em CAD, o passo a passo dos menus do ANSYS e como será feita a análise dos resultados obtidos na simulação. Existem algumas regras e limitações do design e de hardware que são relevantes para a aquisição dos dados, que serão discutidos a seguir.

Foram projetados três modelos, os quais seguem o projeto do chassi visualizado na Figura 13, e a Figura 14 mostra os veículos usados como base, com algumas mudanças de características entre si. A Tabela 1, descreve características dos três modelos concebidos.

Tabela 1 – Características dos modelos desenhados para análise.

Modelo 1	Projetado com base nos projetos antigos da UTECO (Figura 1), com o intuito de servir como comparativo e apenas revestir o chassi da Figura 13;
Modelo 2	Projetado usando outras equipes como base, também como o objetivo de melhorar a geometria e a estética do veículo;
Modelo 3	Similar ao Modelo 2, porém utilizando um recurso bastante usado na Shell Eco-Marathon, proteções nas rodas.

Fonte: Autoria própria.

3.1 PREPARAÇÃO DOS MODELOS CAD

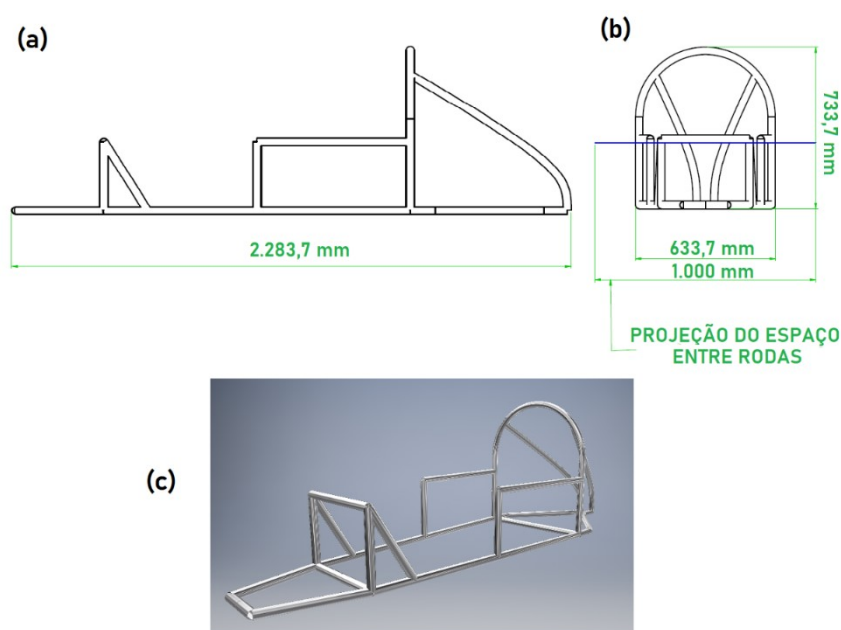
Os desenhos foram baseados em projetos já existentes, de equipes que competiram na Shell Eco-Marathon (SEM), e não sendo restrito a apenas edições no Brasil. Os *designs* que serviram como base foram escolhidos baseados nos coeficientes de arrasto disponibilizados.

Em todo início de ano a SEM divulga o regulamento global, o qual deve ser seguido por todas as equipes do mundo. Para a categoria protótipo, de acordo com o regulamento Global da SHELL, deverá seguir as seguintes orientações referentes à geometria:

- veículos do tipo protótipo devem ter três ou quatro rodas, que estejam em constante contato com o chão;
- a carenagem do veículo, incluindo painéis e/ou para-brisas devem ser rígidos e não podem se moldar pela ação do vento;

- apêndices aerodinâmicos que mudam a geometria devido ao vento não são permitidos;
- todos os veículos precisam ser completamente cobertos. Veículos com capota aberta não serão permitidos. Veículos que se assemelhem a bicicletas ou triciclos também não serão aceitos;
- os veículos devem possuir uma barra de rolagem eficiente que se esteja sempre a 50 mm do capacete do piloto, em posição normal de direção;
- a altura máxima do veículo não poderá ultrapassar 1000 mm (um metro);
- a largura entre as rodas mais externas deverá ser de pelo menos 500 mm;
- a razão entre os dois itens anteriores, respectivamente, deverá ser de menos de 1,25;
- a distância entre as rodas dianteiras e traseiras deve ser de pelo menos 1000 mm;
- a largura máxima do veículo é 1300 mm;
- o comprimento máximo é 3500 mm.

Figura 13 - Chassi da equipe UTECO para a edição 2020, renderizada no Autodesk Inventor 2018. Em (a) tem-se a vista lateral com a medida de comprimento; em (b) a vista frontal com as medidas de altura, de largura do chassi e da projeção do espaço entre as rodas; em (c) a forma renderizada isométrica do chassi, em alumínio.



Fonte: Autoria própria.

Considerando os fatores citados acima, com o auxílio do software Autodesk Inventor 2020 (Inventor) foi então criada e editada com a ferramenta *box* uma carenagem em volta do chassi da Figura 13, para então finalizar a concepção dos três modelos.

Figura 14 – Veículos usados como base para os Modelos 2 e 3. (a) BYU Supermileage (CD = 0.107); (b) Si Pitung G4 (CD = 0.13); (c) Eco-Arrow (CD = 0.096); Pac-Car II (CD = 0.075).

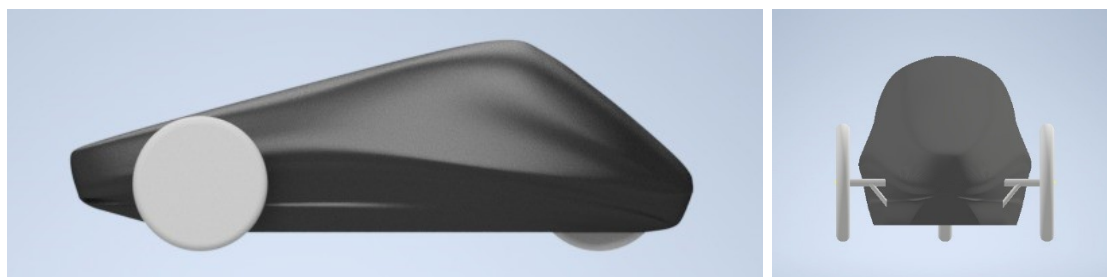


Fonte: (a, c e d) (SUCH, 2018); (b) (SIROJUDDIN; ENGINEU; WARDOYO, 2019).

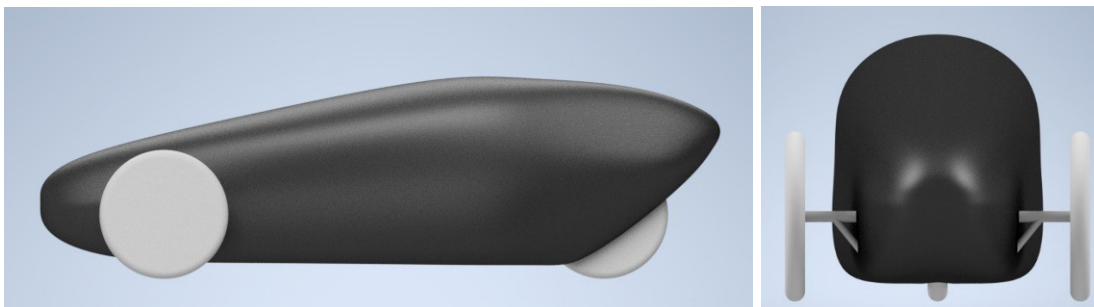
Por conseguinte, foram projetados virtualmente os três modelos como se seguem nas Figuras 15, 16 e 17.

Os veículos da Figura 14 serviram como inspiração para o desenvolvimento da carenagem da UTECO. Outros desenhos contribuíram para a geometria, devido à estética, mas esses são carros que possuem estudos sobre seu coeficiente de arrasto.

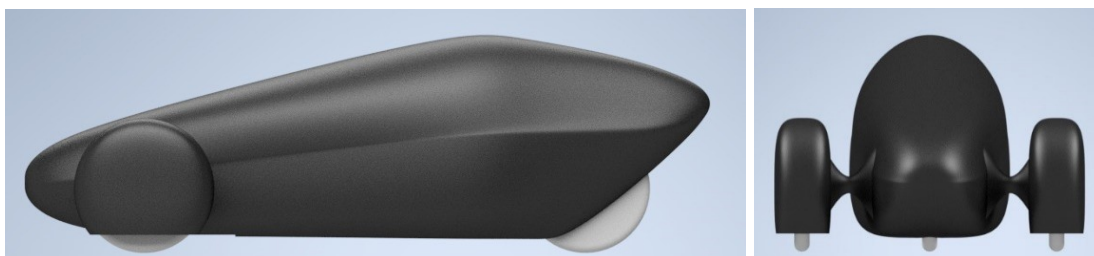
Figura 15 – Modelo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 – Modelo 2.

Fonte: Autoria Própria.

Figura 17 – Modelo 3

Fonte: Autoria própria.

O modelo 1 é o modelo usado como base para comparação, baseado nos veículos anteriores que apenas recobrem o chassi. O modelo 2 é um modelo com um design baseado em outros estudos e equipes, e o modelo 3 é similar ao modelo 2, porém com proteção nas rodas dianteiras, característica comum em diversos veículos na competição.

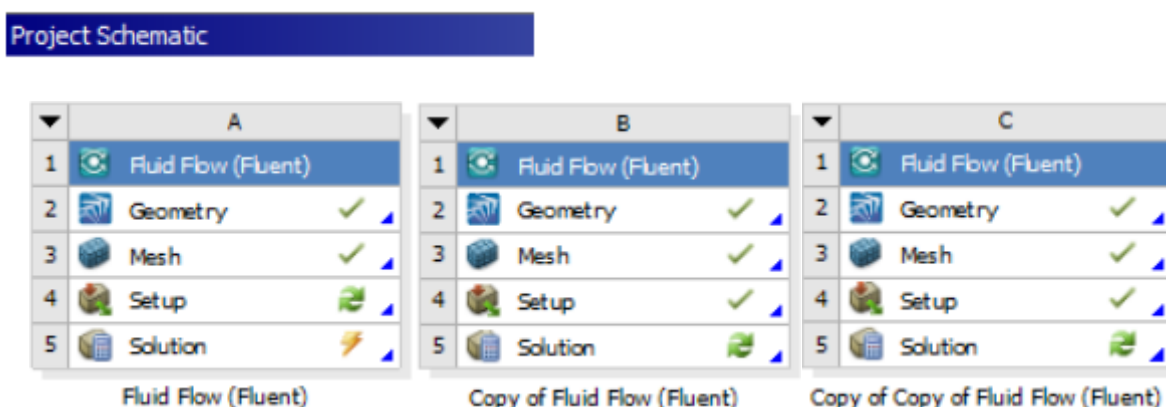
3.2 PREPARAÇÃO PARA ANÁLISE EM CFD

O software utilizado na análise é o ANSYS 2019 R1, na UTFPR – Guarapuava, que possui a licença do mesmo. A máquina encarregada em rodar a simulação possui os requisitos: processador Intel® Core™ i5-7200U CPU @ 2,50 GHz, 4 GB de RAM e Placa de Vídeo Integrada Intel® HD Graphics 620.

Utilizou-se o *Fluid Flow (Fluent)* do ANSYS, para realizar a análise em escoamento de fluidos e então foram importadas as geometrias dos três modelos no Mesa de trabalho do ANSYS. O desenho foi aberto no *SpaceClaim* para concepção do volume de controle, e para realização da análise, criou-se ao redor do modelo um volume para representar o local por onde o fluido irá escoar. Uma analogia possível de se fazer é assumir que esse volume seria uma espécie de "túnel de vento virtual". o corpo desenhado é então removido, deixando apenas um

“molde” na parte que irá escoar (para melhor compreensão, ver imagens no capítulo seguinte). A figura 18 mostra a organização do Mesa de trabalho no ANSYS, em que é organizado no projeto todas as etapas e procedimentos.

Figura 18 – Mesa de trabalho do ANSYS com o Modelo 1 (A), 2 (B) e 3 (C).

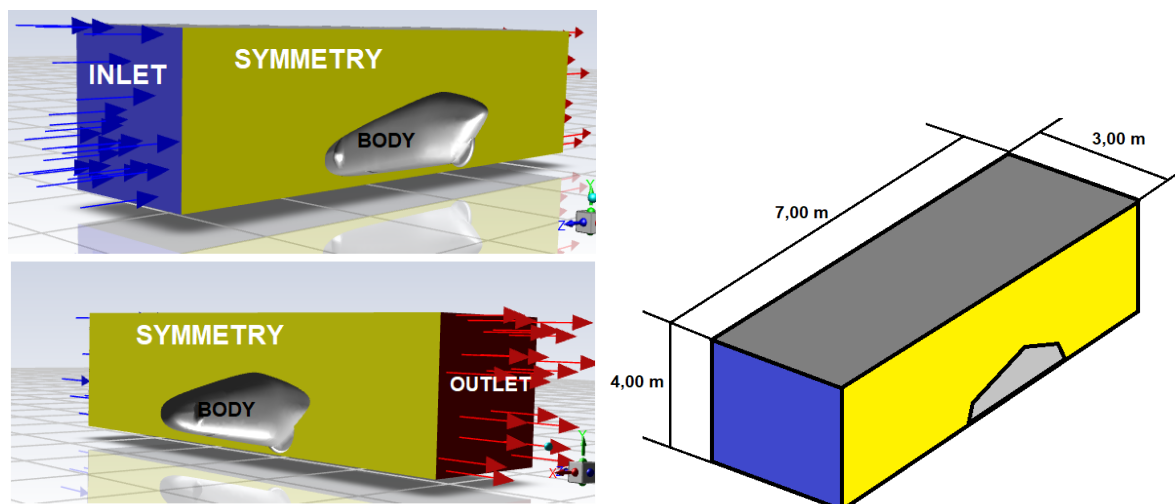


Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 18 a seção de Geometria é onde é importado o desenho feito no Inventor, o *Mesh* (Malha) é a seção em que se estabelece a malha de trabalho, e os menus *Setup* e *Solution* (Solução) são atrelados à ferramenta de solução “*Fluent*” do ANSYS, em que é inserido os parâmetros, dados e condições de contorno pertinentes à análise.

Após estabelecer as geometrias dos veículos, começa-se a exportação para o software ANSYS. O primeiro passo é importar a geometria concebida no Inventor para o *SpaceClaim*, ferramenta de CAD do ANSYS. É importante ressaltar, que o estudo, apesar de avaliar o coeficiente de arrasto do veículo, leva em consideração o comportamento do fluido, então o objetivo da simulação é de estudar o fluido, portanto é necessário criar um volume de controle que contenha o fluido, contornando a geometria do modelo. Os volumes de controle possuem mesma dimensão, e são concebidos de maneira que as paredes não influenciem na região mais próxima ao veículo. Ou seja, que a interferência fique contido às regiões laminares afastadas ao corpo. A Figura 19 ilustra o volume de controle.

Figura 19 – Dimensões do volume de Controle e Seções relevantes.



Fonte: Autoria própria.

Após determinação do Volume de controle subtraído o veículo, tem-se o fluido para estudo. Existem 5 áreas importantes na concepção dos volumes de controle. A primeira é o *inlet*, que é a região pela qual entra o fluido estudado. A segunda é o *outlet*, local de saída, e as demais regiões são as paredes, indicadas como *walls*. Toda região não nomeada, se torna uma parede. Uma outra região, que pode ser utilizada em casos de simetria, é a *Symmetry*, utilizada neste trabalho. É um recurso que permite refinar ainda mais a malha, para que se aproxime mais da realidade, economizando tempo e recursos computacionais. A principal área, é aquela que indica o corpo sendo estudado, nomeado de *body* na Figura 19. Feito isso, é então iniciada a concepção da malha. O máximo de elementos permitidos pela licença disponível era 510 mil, portanto, devido a essa limitação, foi o máximo de refino possível para os modelos estudados.

A segunda parte consistiu em construir a malha. Para tal foi aberto o menu *Mesh*, que pode ser visualizado nos menus da Figura 18. Esse recurso cria a malha para análise, dividindo o volume concebido no *SpaceClaim* em diversos volumes menores, seguindo os princípios de elementos finitos, dos quais cada elemento representa uma porção do volume de controle. Quanto mais próximo de partículas esses elementos chegarem, melhor a qualidade dos dados, mas também melhor deve ser o hardware, então para realizar a análise, deve-se aproximar o número ao menor valor possível. A análise em setores laminares não é interessante para o caso, e nem mesmo em partes não viscosas, mas na região da camada limite são dados essenciais,

então com o uso dos recursos *inflation*, *sizing* e *quality*, é possível refinar a camada limite para que haja um foco nas regiões mais próximas à superfície do modelo.

A opção *setup* abre o *Fluent*, em que se escolhe a opção 3D e Dupla Precisão, para obter dados mais acurados. Com o *setup* aberto, é definido o modelo de viscosidade, das quais entre as opções definidas, serão utilizados, na sequência, o Laminar e então o modelo *standard k – ε*, para assim ter uma melhor conversão de dados. Na aba de Materiais foram adicionadas as propriedades do ar, levando em consideração dados da cidade do Rio de Janeiro - RJ, pois é lá que é sediado o evento da SEM. Então foram inseridas as condições de contorno, levando em contatos parâmetros na região de entrada de escoamento de ar (*inlet*), interior do modelo, paredes e na região de saída (*outlet*).

Com uma velocidade média de 30 km/h, e considerando uma temperatura de 25°, os demais dados são retirados das propriedades do ar à nível do mar, já que a sede da SEM no Brasil, atualmente, é na cidade do Rio de Janeiro – RJ. A Tabela 2 mostra os valores e condições que foram considerados na análise.

Tabela 2 – Condições de contorno comuns a ambos os modelos.

Parâmetro	Valor
Velocidade (m/s)	8,3333
Pressão (Pa)	101325
Temperatura (K)	303,16
Viscosidade Cinemática (m^2/s)	$1,872 \times 10^{-5}$
Densidade (kg/m^3)	1,164

Fonte: ÇENGEL; CIMBALA (2015).

A Tabela 3 mostra as características particulares de cada modelos. Todos os valores nas Tabelas 2 e 3 foram inseridos nas configurações do ANSYS, para realização dos cálculos.

Tabela 3 – Condições de contorno singulares a cada modelo.

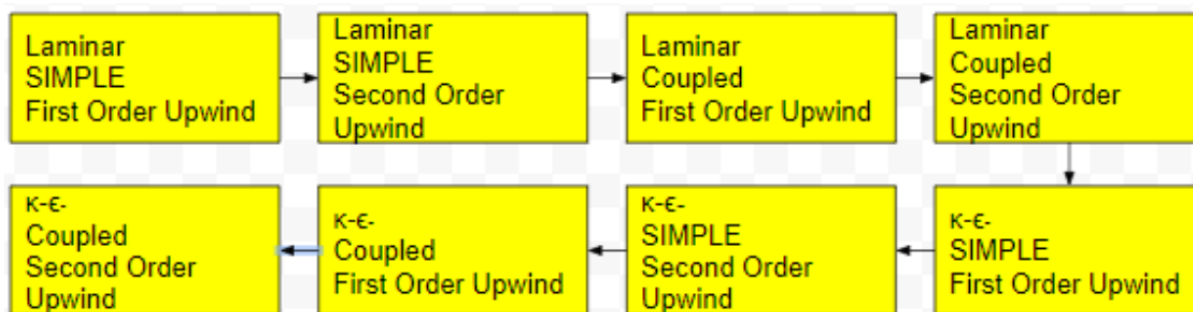
Parâmetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
Área Frontal (m^2)	0,467	0,468	0,537
Comprimento (m)	2,34	2,52	2,52

Fonte: Autoria própria.

Na seção de “solução”, foram definidos os métodos numéricos de solução, e os valores que o software irá calcular. Ao todo foram realizados 8 cálculos e estabelecidos os parâmetros

para a solução é então executado o programa, seguindo o esquema da Figura 20, obtendo então os resultados para Coeficiente de Arrasto dos modelos.

Figura 20 – Fluxograma da ordem de cálculos a serem feitos.



Fonte: Autoria própria.

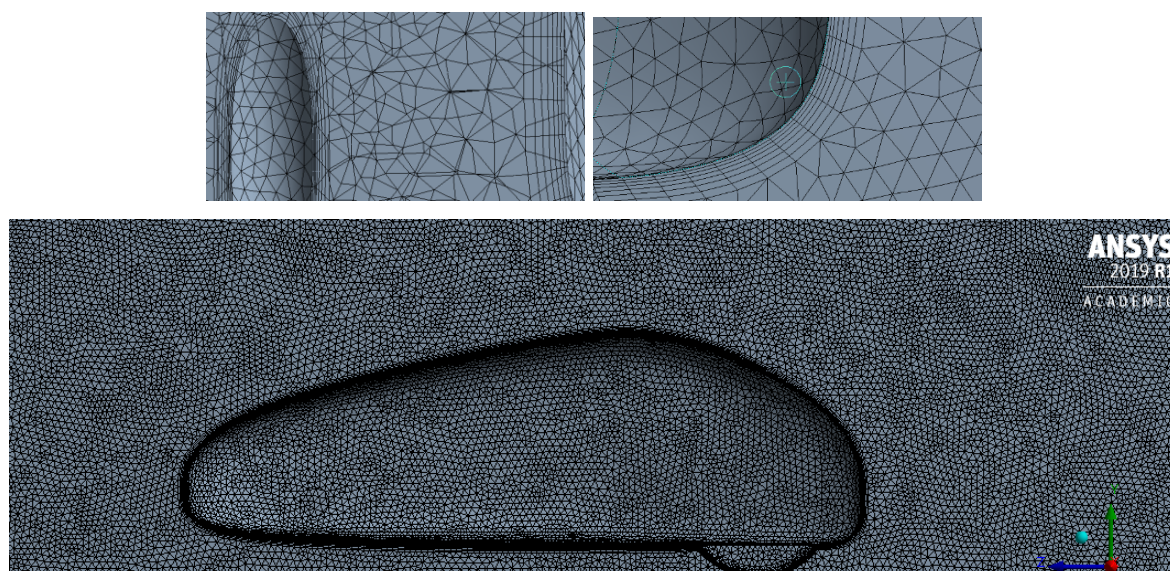
Este sistema da Figura 20, foi elaborado visando um aumento de estabilidade dos cálculos do ANSYS, uma vez que são cálculos de natureza iterativa, inicia-se com cálculos mais simplificados na primeira parte do fluxograma, melhorando o valor arbitrário inicial, até que chegue no desejado, que é a ultima parte do fluxograma, que é mais acurada em relação à realidade, porém exige mais poder de processamento do computador.

O modelo de escoamento utilizado foi tanto o Laminar quanto o *standard k – ε* . O Laminar foi utilizado apenas como ferramenta para fazer o valor convergir melhor, devido à natureza iterativa do cálculo. Para calcular, foram utilizados dois algoritmos de pressão, o “*SIMPLE*” e o “*Coupled*”. Esses algoritmos são soluções que utilizam diferentes métodos, porém com o mesmo objetivo. O “*SIMPLE*” é um Algoritmo Segregado de Pressão, que soluciona as equações governantes sequencialmente, uma por uma, realizando um método iterativo para tal. O “*Coupled*”, ao invés de solucionar as equações separadamente, substitui as equações separadas por um sistema de equações, que são resolvidas simultaneamente, comprimindo as equações de momento e as equações de conservação de pressão. O primeiro é menos pesado para o computador utilizar, porém o segundo consegue valores mais acurados. Além disso, tem-se os cálculos de primeira (*First Order Upwind*) e segunda (*Second Order Upwind*) Ordem, cuja diferença simplesmente consiste na quantidade de elementos considerados no cálculo. Ou seja, como a Segunda ordem usa mais dados, também fornece resultados mais próximos da realidade. Foi considerado um escoamento permanente para realização dos cálculos, onde a pressão não se altera ao longo do tempo (ANSYS, 2009).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

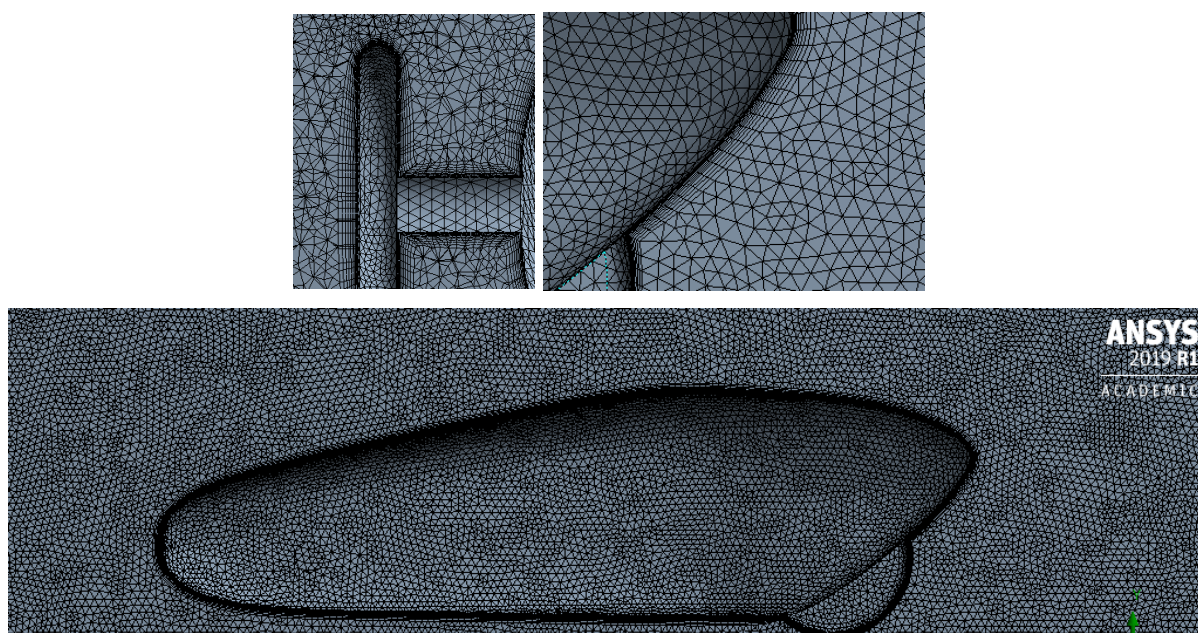
As Figuras 21, 22 e 23, mostram as malhas dos modelos e alguns de seus detalhes.

Figura 21 – Malha do Modelo 1.



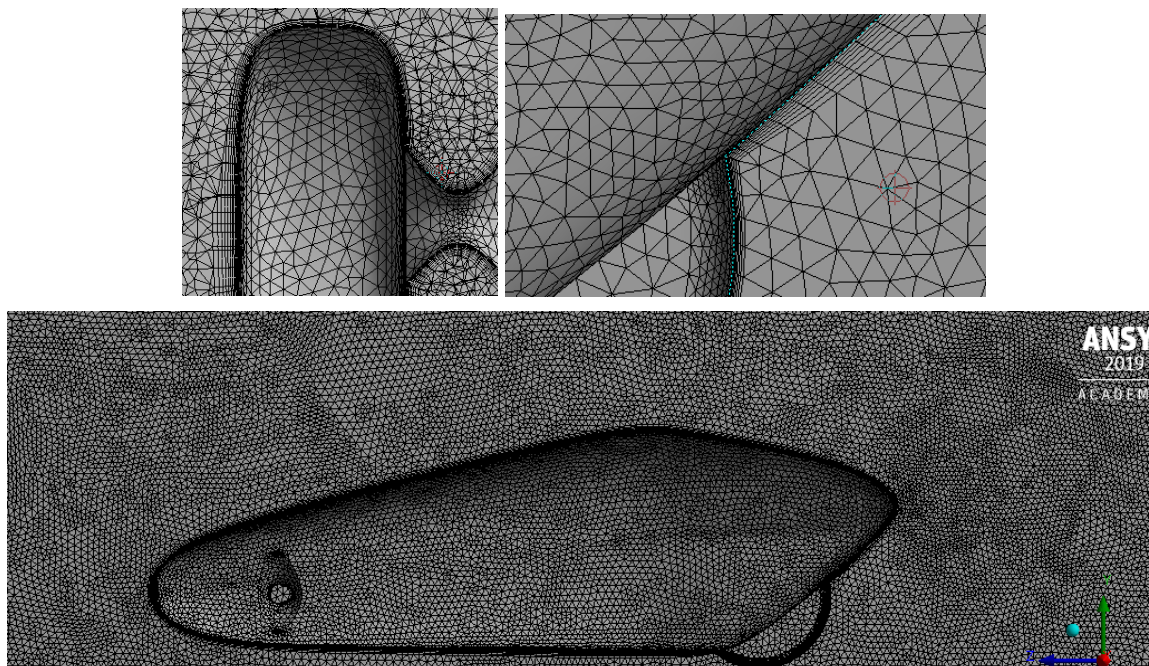
Fonte – Autoria própria.

Figura 22 – Malha do Modelo 2.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23 – Malha do Modelo 3.

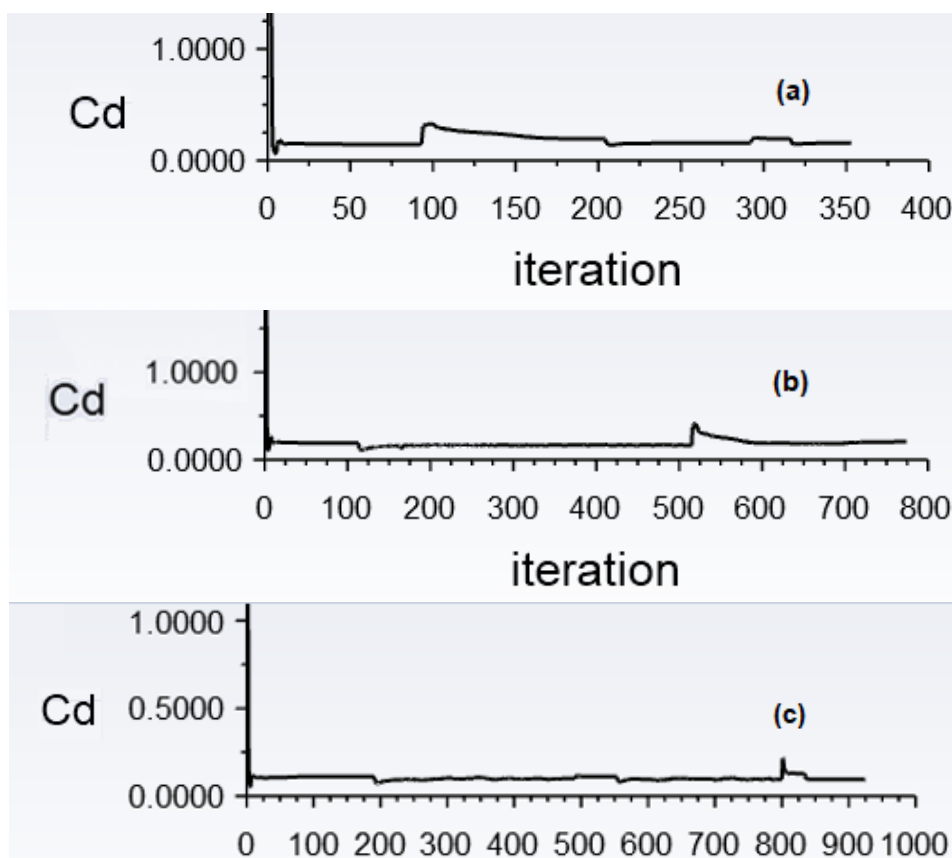


Fonte: Autoria própria.

Como pode ser visto na silhueta, e nos detalhes das rodas e da traseira, a região mais próxima do veículo está mais refinada e detalhada, o que é o objetivo, haja vista que são essas regiões que são mais interessantes para o trabalho, pois são nelas que haverá as alterações na camada limite que importam para a análise, indicando as perturbações causadas pelo escoamento na superfície da carenagem, as quais podem ser visualizadas a seguir nas figuras 25 e 26.

Após a importação a concepção das malhas, e da inserção das condições de contorno no *setup*, é possível realizar a execução da simulação no software ANSYS, e então os dados obtidos são interpretados para a análise dos três protótipos virtuais. Primeiramente, é possível visualizar o gráfico de convergência do coeficiente de Arrasto dos três modelos em questão na Figura 24.

Figura 24 – Gráficos de convergência do Coeficiente de Arrasto dos modelos 1 (a), 2 (b) e 3 (c) (C_d X Número de Iterações).

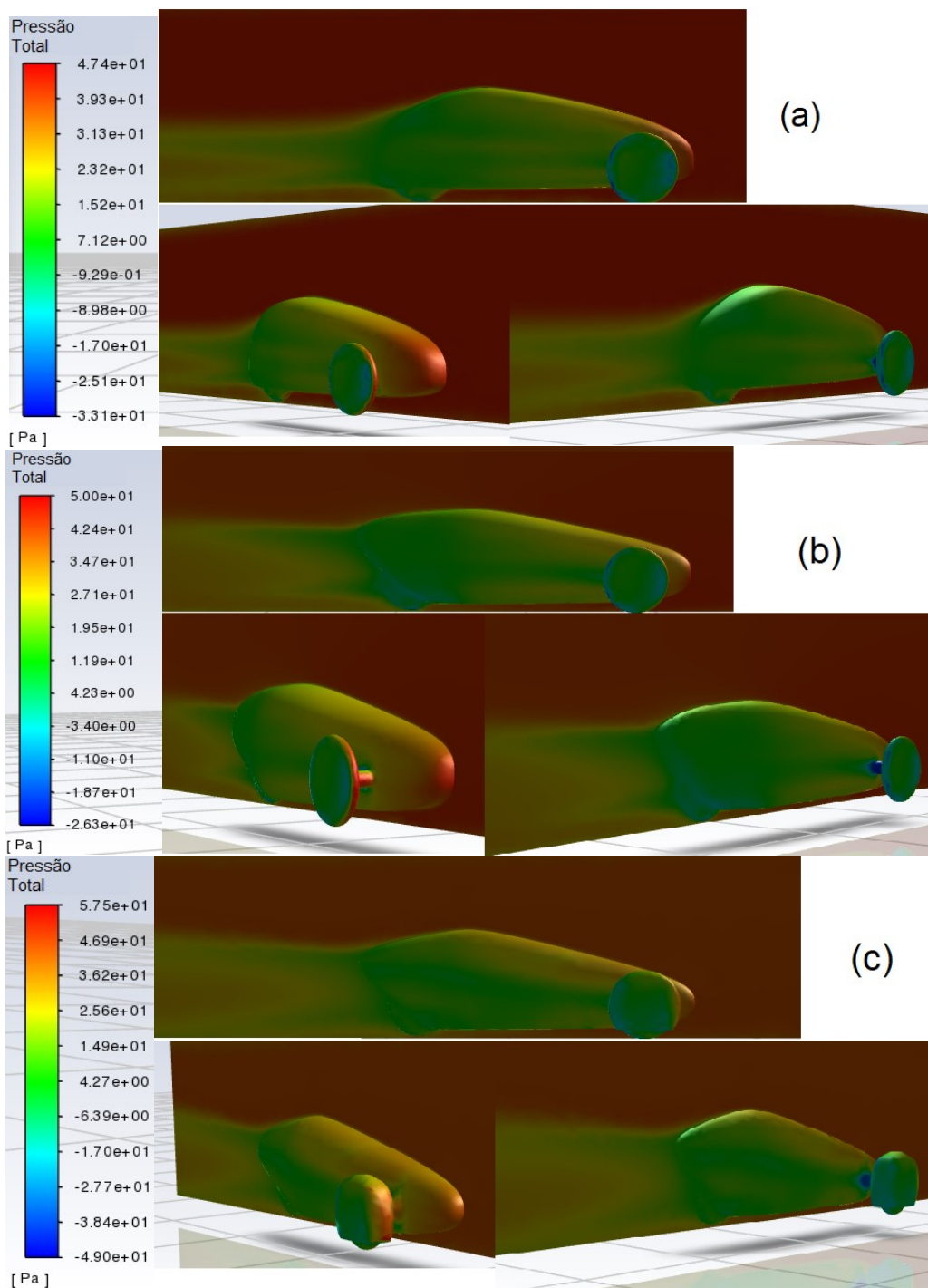


Fonte: Autoria própria.

Os picos nos gráficos da Figura 24 indicam onde ocorreu as mudanças de parâmetro indicadas da Figura 20. Os cálculos foram programados para encerrar até que o valor convergisse, não foi programado um número máximo de iterações.

A Figura 25 mostra a pressão estática nos veículos, que é a resultante que atua como uma unidade de força exercida por unidade de área, identificado em cada ponto no campo de escoamento de fluido (CONNOR, 2019).

Figura 25 – Pressão total nos modelos 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

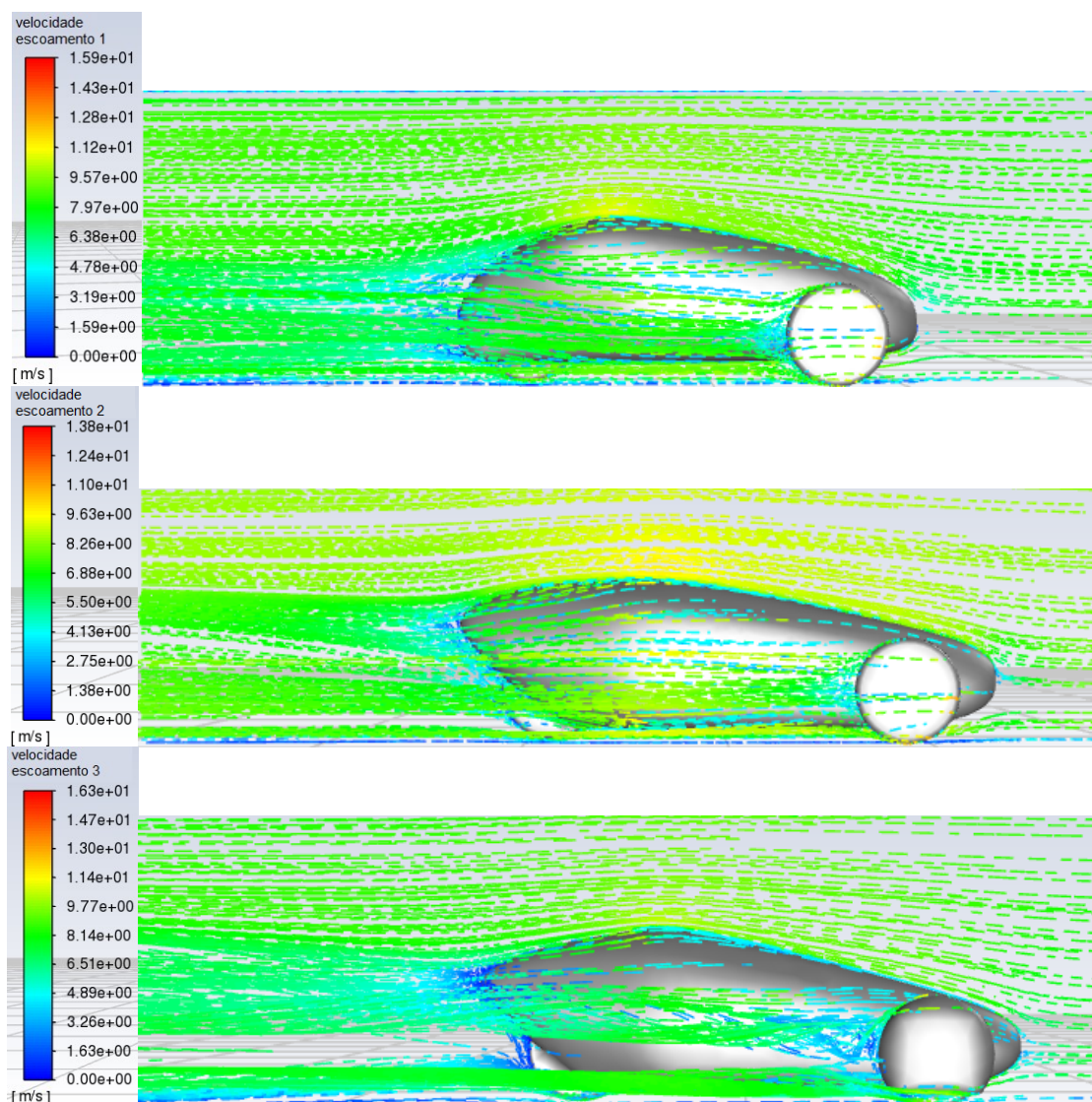


Fonte: Autoria própria.

Os pontos em vermelho indicam pontos em que a força normal é mais elevada em razão da pressão do fluido durante o escoamento e o do atrito causado pelo contato entre o corpo e o

fluido. Dentre os modelos percebe-se que o Modelo 2 (Figura 25.b) tem uma pressão relativamente menor em relação aos demais, de acordo com os gradientes representados, sendo a parte frontal a região mais crítica, indicando que deve haver uma maior atenção às regiões em vermelho, pois segundo o regulamento da SEM, a carenagem não pode se moldar no vento, ou seja precisa ter o mínimo de resistência para que mantenha a integridade, e serve como referência para a construção, dando atenção a esses pontos críticos.

Figura 26 – Linhas de escoamento dos modelos 1 (a), 2 (b) e 3 (c).



Fonte: autoria própria.

Na Figura 26 é possível visualizar como se comporta o fluido ao redor de cada modelo. Novamente é possível visualizar a redução na velocidade de escoamento na traseira dos

modelos. Também é possível ver como a velocidade do fluido se altera de acordo com a geometria.

A região em azul mostra uma redução na velocidade do escoamento, e essa diminuição na velocidade indica a existência de uma baixa pressão na traseira, que causa um efeito negativo à medida que a velocidade do veículo aumenta, devido ao descolamento da camada limite na traseira, em uma região de turbulência. O ideal é que o fluido escoe de maneira mais uniforme possível para que esse fenômeno não ocorra (BYORC, 2020).

Por fim, após analisar as imagens deste capítulo e avaliar os resultados, foram obtidos após as iterações os valores de coeficiente de arrasto dos três modelos sob análise, como se segue na Tabela 4. Os três modelos foram projetados pelo autor no Inventor.

Tabela 4 – Coeficientes de arrasto dos modelos.

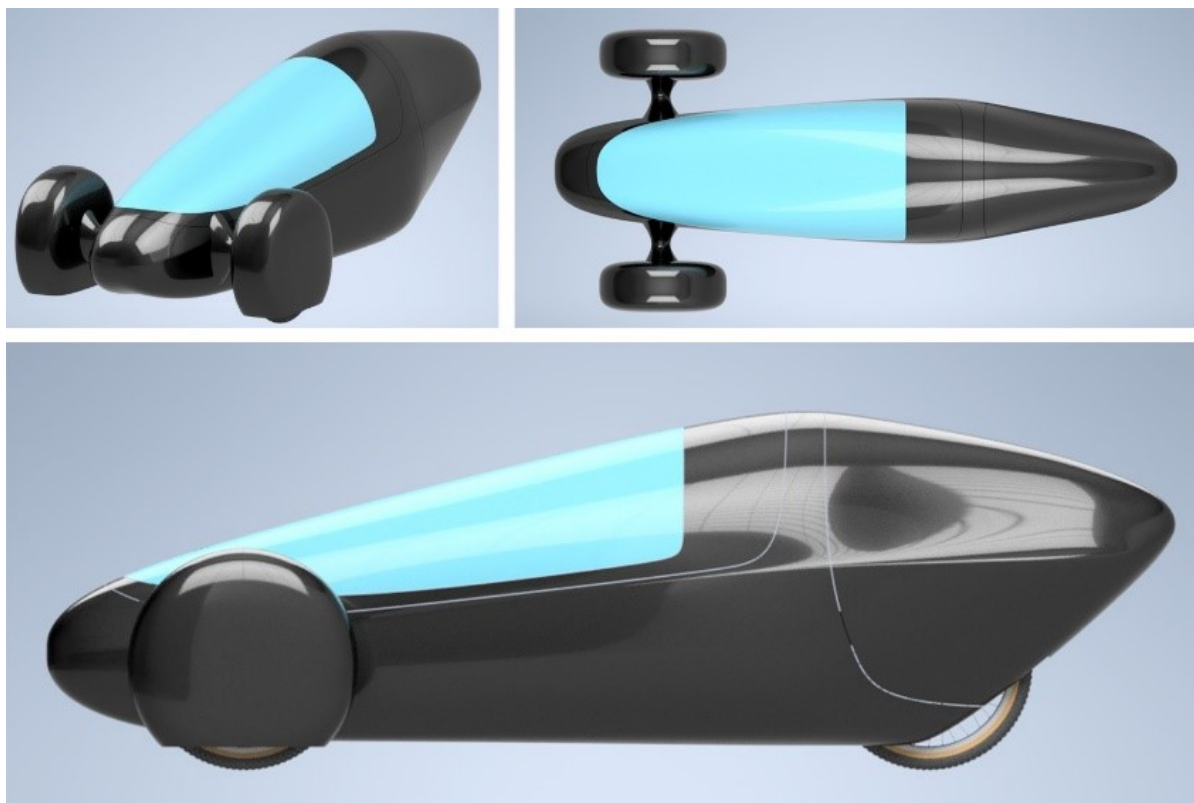
Parâmetro	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
C_d	0,10830	0,10193	0,09999

Fonte: Autoria própria.

Os dados obtidos refletem que o Modelo 3 é aquele com menor coeficiente de arrasto, portanto favorece o deslocamento do veículo, diminuindo assim o consumo de combustível do veículo. Como fora determinado o objetivo anteriormente, o estudo foi feito para se escolher o modelo que será construído pela equipe da UTECO para a SEM seguinte.

O último dos objetivos deste trabalho é definir o design final do veículo, utilizando o modelo cujo coeficiente de arrasto seja o mais baixo, e segue na Figura 27 o desenho final, renderizado no Inventor, já com rodas e para-brisa.

Figura 27 – Modelo 3 finalizado.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

Os objetivos específicos consistiam no desenho de três modelos em CAD para realização da análise aerodinâmica, coletar os dados de coeficiente de arrasto e usá-los para comparação, de modo a definir aquele que será o veículo construído pela UTECO para a Shell Eco-Marathon. Dentre os três modelos estudados, percebeu-se que o número 3 é o de melhor arrasto aerodinâmico. O coeficiente do terceiro é 0,85% menor que o segundo, o que é, de certa forma, pequeno, mostrando a similaridade já citada entre os dois desenhos, já que a única diferença é a proteção nas rodas do modelo 3. Entretanto, comparando o terceiro com o primeiro, encontra-se uma diferença de 7,8% nos coeficientes, o que, por sua vez, é significativo, mostrando que as alterações na geometria, baseadas nas equipes anteriores da SEM melhoram o escoamento do ar pela carenagem do carro.

Em relação à proteção nas rodas, é um elemento que aumenta um pouco a área frontal do veículo, porém, evita que ocorra turbulência ou perturbações provocadas pela rotação das rodas, algo que atrapalha aerodinamicamente. Essa adição ao projeto ocorreu por inspiração de outras equipes, através da troca de conhecimento durante a competição, enaltecendo que o objetivo da SEM não é apenas a competição, e ter o veículo mais econômico, mas favorecer uma conectividade entre estudantes de todos os lugares do mundo, em busca de um único objetivo: desenvolver uma tecnologia mais eficiente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A UTECO proporcionou não apenas este aprendizado na área aerodinâmica, mas devido à identificação com a área e a liderança da área estrutural, foi decidido realizar a análise aerodinâmica, e através desse trabalho focado para o carro, foi percebido o potencial acadêmico nesta área. A aerodinâmica é muito maior que apenas o coeficiente de arrasto. Para trabalhos futuros na área, seguem sugestões:

- Realizar estudos além do coeficiente de arrasto, como análise da pressão, vibrações, calor, etc.;
- Comparar diferentes tipos de malhas, heterogêneas e homogêneas, assim como usar mais elementos ou menos, com uma sugestão de tema: “Como a malha afeta a análise aerodinâmica utilizando CFD”;
- Conseguir realizar testes práticos em túneis de vento e comparar com resultados de simulação em CFD;
- Comparar resultados de simulação em diferentes softwares;
- Comparar resultados obtidos com diferentes modelos de escoamento.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, J. D. *Fundamentals of Aerodynamics*. 5. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2011.
- ANSYS Inc. *ANSYS Fluent 12.0 Theory Guide: 18.1.1 Pressure-Based Solver*. 2009. Disponível em: ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide - 18.1.1 Pressure-Based Solver (enea.it). Acesso em 06 de outubro de 2020.
- BYORC (Build Your Own Race Car). *Race car aerodynamics basics and Design. Resources for the amateur car designer and Builder*. Disponível em: <https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/>. Acesso em 19 de abril de 2021.
- CONNOR, Nick. **O que é pressão estática – Definição**. *Thermal-engineering.org*, 2019. Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-pressao-estatica-definicao/>. Acesso em 19 de abril de 2021.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- FOX, R. W. et al. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- GRUNDITZ, E. A.; JANSSON, E. *Modelling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart*. Outubro 2011. 182 f. Dissertação (Master of Science Thesis in Electric Power Engineering) — Chalmers University of Technology, Göteborg, Suécia, 2009.
- HALL, Nancy. *What is Drag?* Glenn Research center: Nasa. 2015. Disponível em: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/drag1.html>. Acesso em 15 de abril de 2021.
- LAJOS, T. *Basics of vehicle aerodynamics*. 2002. Disponível em: www.ara.bme.hu/oktatas/letolt/Vehicleaerodyn/Vehicleaerodyn.pdf. Acesso em: 10 de janeiro de 2020.
- POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos Fluidos**. Porto Alegre: Bookman, 2018.
- SHELL ECO-MARATHON. **2020 OFFICIAL RULES: CHAPTER I**. [S.l.], 2020. 47 p.
- SIROJUDDIN; R. ENGINEU; WARDOYO. *Aerodynamic Drag Reduction of Vehicle Si Pitung G4 UNJ for Shell EcoMarathon Asia 2015*. 3rd UNJ International Conference on Technical and Vocational Education and Training 2018, KnE Social Science, pages 304–311. DOI 10.18502/kss.v3i12.4096
- SIVARAJ, G; PARAMMASIVAM, K. M.; SUGANYA G. *Reduction of Aerodynamic Drag force for Reducing Fuel Consumption in road Vehicle using Basebleed*. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol 11, No. 66, pp. 1489-1495, 2018. DOI: 10.18869/acadpub.jafm.73.249.29115. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sivaraj->

Gurunathan/publication/328803849_Available_online_at_wwwjafmonlinenet/links/5bed29d4a6fdcc3a8dd74d5f/Available-online-at-wwwjafmonlinenet.pdf. Acesso em 15 de abril de 2021.

VERGEL, J. L. G. **Estudo da Influência da Malha Computacional, Modelos de Turbulência e Aspectos Numéricos da Modelagem CFD em Impelidores PBT usando Malhas Não-estruturadas**. Outubro 2011. 157 f. Dissertação (apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, na área de concentração de Desenvolvimento em Processos Químicos) — UNICAMP, Campinas, SP, 2013.

WINDLIN, F. et al. **Aerodinâmica veicular**. In: Motores de Combustão Interna Edição 1, Capítulo 5. p. 251–311. Edegard Blucher Ltda, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277003631_Aerodinamica_Veicular. Acesso em 10 de janeiro de 2020.