

**JOSÉ IGOR CALSAVARA BOUGO**

**EFEITOS DA AERODINÂMICA NO DESEMPENHO E  
EFICIÊNCIA DE VEÍCULOS SEDANS ELÉTRICOS**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2023**

**JOSÉ IGOR CALSAVARA BOUGO**

Orientador

**Prof. Dr. Odenir de Almeida**

**EFEITOS DA AERODINÂMICA NO DESEMPENHO E  
EFICIÊNCIA DE VEÍCULOS SEDANS ELÉTRICOS**

**Projeto de Conclusão de Curso** apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **BACHAREL em ENGENHARIA AERONÁUTICA.**

**UBERLÂNDIA - MG**

**2023**

# **EFEITOS DA AERODINÂMICA NO DESEMPENHO E EFICIÊNCIA DE VEÍCULOS SEDANS ELÉTRICOS**

Projeto de conclusão de curso **APROVADO** pelo Colegiado do Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Odenir de Almeida  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Prof. Dr. João Rodrigo Andrade  
Universidade Federal de Uberlândia

---

Eng<sup>a</sup> Samara Cunha Rosa  
Eng<sup>a</sup> Mecânica (Aerodinâmica Automobilística)

**UBERLÂNDIA - MG**

**2023**

*Para minha família.*

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este projeto de conclusão de curso a minha família, meus pais e minha irmã, que em toda minha vida me apoiaram e deram todo o suporte para que eu pudesse seguir meus sonhos, sustentando qualquer dificuldade para que eu pudesse me dedicar apenas aos estudos.

Agradeço aos meus amigos que me ajudaram na adaptação à nova cidade, que me motivaram a continuar no curso, que passaram noites comigo realizando trabalhos e estudando para as provas e que estiveram juntos todos os momentos nesta minha trajetória na UFU.

Aos professores, técnicos e servidores da Faculdade de Engenharia Mecânica cuja disposição e dedicação durante o período de graduação foram essenciais no processo de minha formação como um profissional, e em especial, agradeço ao professor Odenir de Almeida pela orientação, esclarecimentos e ajuda para que eu pudesse concluir este Projeto Final de Conclusão de Curso em Engenharia Aeronáutica.

Por fim, deixo registrado meu agradecimento à VirtualCAE por disponibilizar a utilização do software CarSim neste projeto, além de todo treinamento oferecido ao longo do período de estágio.

BOUGO, J. I. C. **Effects of aerodynamics on the performance and efficiency of electric sedan vehicles.** 2023. 83p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

### ABSTRACT

Electric automotive models have been conquering the market and it is increasingly necessary to understand points of improvement in their projects. This work had as main purpose to analyze and measure the relationship between the main aerodynamic coefficients with the performance in maneuvers and efficiency in the battery consumption of electric sedan automotive vehicles. Aerodynamic coefficients were obtained through fluid-dynamic computational numerical simulations by the finite volume method performed through Ansys 2022 R2® in which real vehicle models were used as simplified CAD representations at a scale of 1:10. With the data obtained after the simulations for different slip angles, data tables related to aerodynamics were imported for a standard electric sedan vehicle model available in the library of the vehicle dynamics software CarSim 2022.0®. Test procedures for maximum speed, braking distance and crosswind were created to assess vehicle forces and performance during the tests. In addition, endurance simulations were made where each model ran a track of a virtual test field in which the energy consumption was evaluated in the period. Finally, a matrix of correlation was created between the aerodynamic parameters with the results obtained in the virtual tests in order to quantify the relationship between them. A large negative relationship was noted between drag and maximum speed and energy efficiency, and a highly positive relationship between downforce and braking performance, in line with theoretical definitions.

**KEYWORDS:** *aerodynamics, electric vehicles, performance, fluid dynamics, numerical analysis.*

BOUGO, J. I. C. **Efeitos da aerodinâmica no desempenho e eficiência de veículos sedans elétricos**. 2023. 83p. Projeto de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

## RESUMO

Modelos automotivos elétricos vêm conquistando o mercado e cada vez mais é necessário compreender pontos de melhoria nos seus projetos. Este trabalho teve como principal propósito analisar e mensurar a relação entre os principais coeficientes aerodinâmicos com o desempenho em manobras e eficiência no consumo de bateria de veículos automotivos sedans elétricos. Coeficientes aerodinâmicos foram obtidos através de simulações numéricas computacionais fluidodinâmicas pelo método dos volumes finitos realizadas através do Ansys 2022 R2® em que foram utilizados modelos de veículos reais representados simplificada em CAD em escala de 1:10. Com os dados obtidos após as simulações para diferentes ângulos de derrapagem, importou-se para as tabelas de dados relativas à aerodinâmica para um modelo de veículo sedan elétrico padrão disponível na biblioteca do software de dinâmica veicular CarSim 2022.0®. Foram criados procedimentos de testes de velocidade máxima, distância de frenagem e rajadas de ventos laterais para avaliar forças e desempenho dos veículos durante provação. Além disso, foram realizadas simulações de *endurance* onde cada modelo percorreu uma pista de um campo de provas virtual em que foi avaliado o consumo de energia no período. Por fim, criou-se uma matriz de correlação entre os parâmetros aerodinâmicos com os resultados obtidos nos testes virtuais de forma a quantificar a relação existente entre eles. Notou-se uma grande relação negativa entre arrasto e velocidade máxima e eficiência energética e uma relação altamente positiva entre *downforce* e desempenho de frenagem, indo de acordo com definições teóricas.

**PALAVRAS CHAVE:** aerodinâmica, veículos elétricos, desempenho, fluidodinâmica, análise numérica.

## Lista de Figuras

Figura 1.1 – Ányos Jedlik e sua invenção: o primeiro motor elétrico (Disponível em:< en.wikipedia.org/wiki/%C3%81nyos_Jedlik >. Acesso em agosto 10,2022)	16
Figura 1.2 – La Jamais Contente, primeiro veículo automotivo a atingir 100 km/h (Disponível em:< continental-circus.blogspot.com/2014/04/o-pioneiro-do-dia-camille-jenatzy.html>. Acesso em agosto 10,2022)	17
Figura 1.3 – Linha de produção do modelo Ford T (Disponível em:< https://incrivelhistoria.com.br/henry-ford-t/ >. Acesso em agosto 11,2022)	18
Figura 1.4 – Elon Musk, CEO da principal montadora de veículos, a Tesla (Disponível em:< https://supercarros.cc/noticias/detalhe/voce-sabe-o-que-e-a-tesla-motors >. Acesso em agosto 11,2022)	19
Figura 3.1 – Perfil de velocidade através de uma camada limite (Anderson, 2011)	27
Figura 3.2 – Avanço do gradiente de pressão ao longo da superfície (Josip Basic, 2016)	28
Figura 3.3 – Processo de formação de um escoamento turbulento (H K Versteeg and W Malalasekera, 2007)	29
Figura 3.4 – Transição à turbulência em uma placa plana (Nakayama, 1988)	30
Figura 3.5 – Distribuição de pressão em um veículo padrão (Katz, 1995)	32
Figura 3.6 – Sistema de coordenadas utilizado nos carregamentos aerodinâmicos de um veículo (Jasmin Sehovic, 2016)	32
Figura 3.7 – Dados paramétricos e tabulares utilizados no carsim (CarSim, 2020)	38
Figura 4.1 – Cotas dos modelos pesquisados para o veículo padrão (Discentes da disciplina FEMEC43907, 2018)	44
Figura 4.2 – Relações das dimensões utilizadas para a geração da geometria (Discentes da disciplina FEMEC43907, 2018)	44
Figura 4.3 e 4.4 – Vistas e modelo em CAD do Mercedes E-klasse	45
Figura 4.5 e 4.6 – Vistas e modelo em CAD do Honda Civic	45
Figura 4.7 e 4.8 – Vistas e modelo em CAD do BMW E46	46
Figura 4.9 e 4.10 – Vistas e modelo em CAD do Chevrolet Cruze RS	46
Figura 4.11 e 4.12 – Vistas e modelo em CAD do Audi A3	46
Figura 4.13 e 4.14 – Vistas e modelo em CAD do Fiat Tipo	47
Figura 4.15 e 4.16 – Vistas e modelo em CAD do modelo Padrão	47

Figura 4.17 – Dimensões do domínio de fluido (Disponível em:< <a href="https://www.simscale.com/docs/tutorials/aerodynamic-simulation-vehicle/">https://www.simscale.com/docs/tutorials/aerodynamic-simulation-vehicle/</a> >. Acesso em agosto 20,2022)	48
Figura 4.18 – Geometria do modelo BMW E46 finalizada para a simulação CFD	49
Figura 4.19 – Detalhes da malha e do <i>inflation</i> gerados no modelo BMW E46	51
Figura 4.20 – Espectro de qualidade dos parâmetros de <i>skewness</i> e ortogonalidade (Documentação Ansys, 2022)	52
Figura 4.21 – Valores de referência utilizados no modelo BMW E46	53
Figura 4.22 – Seleção do modelo de turbulência k-omega SST	54
Figura 4.23 – Coloração das faces do domínio conforme tipos de contorno definidos	54
Figura 4.24 – Definição do critério da convergência dos resíduos	55
Figura 4.25 – Definição do <i>report</i> do coeficiente de arrasto	56
Figura 4.26 – Tela com os sistemas utilizados no veículo sedan elétrico	57
Figura 4.27 – Curva de $C_D$ x slip angle ( $^\circ$ )	58
Figura 4.28 – Datasets com os coeficientes aerodinâmicos	58
Figura 4.29 – Tela do CarSim com outros parâmetros aerodinâmicos (CarSim, 2022)	59
Figura 4.30 – Teste de velocidade máxima em linha reta	59
Figura 4.31 – Controle de pressão aplicada no cilindro mestre dos freios	60
Figura 4.32 – Teste de frenagem em linha reta	60
Figura 4.33 – Teste de <i>crosswind</i> sobre pista de baixa fricção	61
Figura 4.34 – Vista superior da pista de <i>handling course</i>	62
Figura 4.35 – Animação do modelo BMW E46 durante teste de <i>endurance</i>	62
Figura 5.1 e 5.2 – Contornos de pressão e vetores de velocidade do modelo padrão	63
Figura 5.3 e 5.4 – Contornos de pressão e vetores de velocidade do modelo E-Klasse	64
Figura 5.5 e 5.6 – Contornos de pressão e vetores de velocidade do modelo Civic	64
Figura 5.7 e 5.8 – Contornos de pressão e vetores de velocidade do modelo Cruze RS	64
Figura 5.9 e 5.10 – Contornos de pressão e vetores de velocidade do modelo BMW E46	65
Figura 5.11 e 5.12 – Contornos de pressão e vetores de velocidade do modelo Audi A3	65
Figura 5.13 e 5.14 – Contornos de pressão e vetores de velocidade do modelo Fiat Tipo	65
Figura 5.15 e 5.16 – Convergência dos resíduos das simulações	66
Figura 5.17 e 5.18 – Convergência dos coeficientes das simulações	67

Figura 5.19 – Comparativo de $C_D$ entre os modelos	68
Figura 5.20 – Comparativo de $C_S$ entre os modelos	68
Figura 5.21 – Comparativo de $C_l$ entre os modelos	69
Figura 5.22 - Comparativo de $C_{mox}$ entre os modelos	69
Figura 5.23 - Comparativo de $C_{moy}$ entre os modelos	70
Figura 5.24 - Comparativo de $C_{moz}$ entre os modelos	70
Figura 5.25 – Valores típicos de $C_D$ em função do número de reynolds	71
Figura 5.26 – Distribuição do $C_D$ em função da área frontal dos modelos	72
Figura 5.27 – Gráfico comparativo entre forças de arrasto	73
Figura 5.28 – Gráfico comparativo entre forças de sustentação	73
Figura 5.29 – Gráfico comparativo entre velocidades máximas	73
Figura 5.30 – Ângulo de incidencia dos ventos laterias	75
Figura 5.31 – Forças laterias resultantes	75
Figura 5.32 – Esterçamento aplicado nas rodas	76
Figura 5.33 – Comparativo de resultados de bateria disponível	77
Figura 5.34 – Comparativo de distância percorrida no endurance	77
Figura 5.35 – Matriz de correlação entre parâmetros	78
Figura 5.36 – Valores de correlação entre parâmetros aerodinâmicos e resultados dos testes	79

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Sumário da biblioteca de aerodinâmica do Carsim	41
Tabela 2 – Sumário estendido da biblioteca de aerodinâmica do Carsim	42
Tabela 3 – Áreas frontais projetadas dos veículos	67
Tabela 4 – Comparativo de desempenho do teste de frenagem	74

## **Lista de Abreviações e Acrônimos**

CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
OEM	Original Equipment Manufacturer

## Lista de Símbolos

$C_l$	Coeficiente de sustentação
$C_D$	Coeficiente de arrasto
$C_S$	Coeficiente de <i>side slip</i>
$C_{mox}$	Coeficiente de momento em x
$C_{moy}$	Coeficiente de momento em y
$C_{moz}$	Coeficiente de momento em z
$C_p$	Coeficiente adimensional de pressão
$\rho$	Densidade do fluido
$U_\infty$	Velocidade do fluxo livre
$A$	Área frontal do veículo
$y^+$	Distância adimensional normal à superfície
$\beta$	Ângulo de deslizamento ou escorregamento
$\mu$	Coeficiente de viscosidade dinâmica
$\tau$	Força de cisalhamento
$\nu$	Coeficiente de viscosidade cinemática
$h$	Distância entre placas
$\delta$	Espessura da camada limite

## Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1 Motivação para o presente trabalho.....</b>	<b>20</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>25</b>
<b>3.1 Mecânica dos fluidos.....</b>	<b>25</b>
3.1.1 Aerodinâmica veicular .....	25
3.1.1.1 Viscosidade .....	25
3.1.1.2 Camada limite .....	26
3.1.2.1 Conceitos fundamentais em turbulência .....	28
3.1.3 Aerodinâmica de veículos automotivos .....	30
3.1.3.1 Coeficientes Aerodinâmicos .....	33
<b>3.2 Análise computacional numérica.....</b>	<b>34</b>
3.2.1 O que é CFD .....	35
3.2.2 Leis de conservação de movimento e massa.....	35
<b>3.3 Análise dinâmica paramétrica .....</b>	<b>37</b>
3.3.1 Veículo .....	39
3.3.2 Aerodinâmica .....	39
3.3.3 Procedimentos.....	42
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1 Modelagem em CAD 3D .....</b>	<b>43</b>
4.1.1 Seleção dos modelos e dimensões .....	43
4.1.2 Criação das geometrias .....	44
<b>4.2 Simulação CFD.....</b>	<b>47</b>
4.2.1 Geometria.....	48

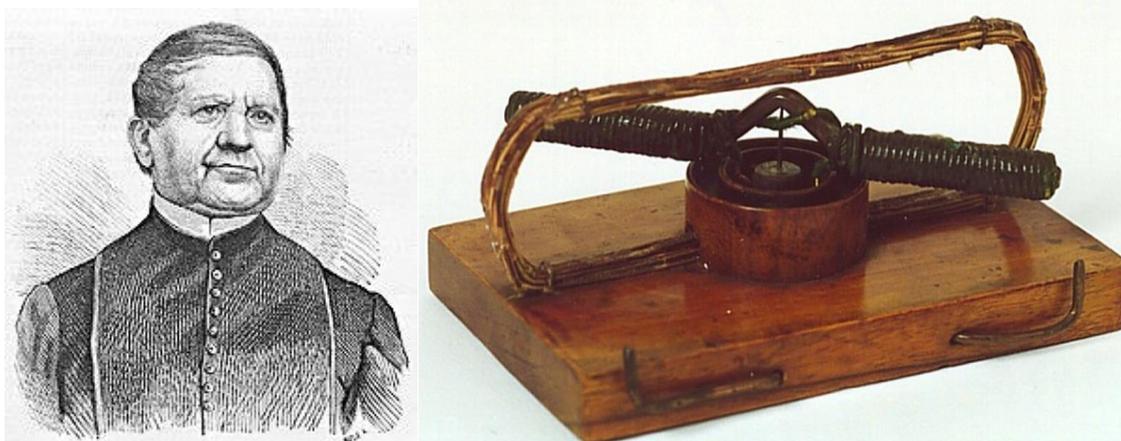
4.2.2 Geração de malha.....	49
4.2.3 Configurações da simulação .....	52
4.2.4 Obtenção dos resultados.....	55
<b>4.3 Configurações de análises dinâmicas com CarSim .....</b>	<b>56</b>
4.3.1 Veículo .....	56
4.3.2 Implementação dos coeficientes .....	57
4.3.3 Procedimentos .....	59
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>63</b>
<b>5.1 Visualização do escoamento em CFD.....</b>	<b>63</b>
<b>5.2 Comparativo de parâmetros aerodinâmicos .....</b>	<b>67</b>
<b>5.3 CarSim .....</b>	<b>72</b>
5.3.1 Top Speed test.....	72
5.3.2 Brake test.....	74
5.3.3 Crosswind test .....	75
5.3.4 Endurance.....	76
<b>5.4 Correlação entre parâmetros.....</b>	<b>78</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>80</b>
<b>6.1 Sugestão para trabalhos futuros.....</b>	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>82</b>

# 1 INTRODUÇÃO

O cenário automobilístico atual se apresenta para uma transição entre os veículos movidos a motores à combustão por modelos híbridos e até puramente elétricos, mas antes dessa onda de empolgação do mercado por esta tecnologia, deve-se saber que o desenvolvimento de carros elétricos é mais antigo do que se imagina. Ele começou aproximadamente no mesmo período dos carros tradicionais, sendo o título de "primeiro carro elétrico" bastante disputado entre vários concorrentes que apresentaram experimentos e modelos em diferentes países.

Conforme apurado por Christopher McFadden (2020), um dos primeiros registros é de Ányos Jedlik em 1828 na Hungria, quando criou um motor elétrico e, para testá-lo, acoplou-o em uma miniatura de carro. O professor holandês Sibrandus Stratingh usou os princípios do eletromagnetismo e dos eletroímãs de Michael Faraday para fazer um modelo em pequena escala em 1835. Neste mesmo ano, também há o registro do norte-americano Thomas Davenport, que fez o primeiro motor elétrico de corrente direta, usando trilhos para carregar um veículo.

FIGURA 1.1 – ÁNYOS JEDLIK E SUA INVENÇÃO: O PRIMEIRO MOTOR ELÉTRICO



FONTE: Wikipedia (2022)

Entretanto, todos esses modelos eram completamente experimentais, pois faltava infraestrutura nas cidades, viabilidade financeira que permitissem a fabricação e utilização em massa e até a existência de certas tecnologias para alcançar um desempenho e eficiência compensatória. As baterias recarregáveis, componente alvo das principais pesquisas e

desenvolvimento por partes das fabricantes, por exemplo, teve seu primeiro exemplar inventado apenas 1859 pelo francês Gaston Planté, ainda de material chumbo-ácido.

Até os primeiros recordes de velocidade foram com os elétricos. Em 1898, o veículo francês Jeantaud Duc atingiu a então inédita marca de 63,15 quilômetros por hora e em 1899, o La Jamais Contente foi o primeiro veículo a superar 100 quilômetros por hora, com o belga Camille Jenatzy.

FIGURA 1.2 – LA JAMAIS CONTENTE, PRIMEIRO VEÍCULO AUTOMOTIVO A ATINGIR 100 KM/H



*FONTE: Continental Circus (2014)*

No começo de 1900, quase 30% dos carros nos Estados Unidos eram elétricos, mostrando dessa forma, que desde o século passado, que a utilização de veículos elétricos era uma alternativa viável de operação em pequenas distâncias e estava em franca ascensão.

Porém, todo esse cenário favorável foi superado quando Henry Ford com seu modelo de produção revolucionário, denominado Fordismo, deu início à indústria de produção em massa de carros a combustível, veículos muito mais práticos e acessíveis à população em geral, dominando assim o mercado, como comentado por Peter Valdes-Dapena e Ivory Sherman (2019).

FIGURA 1.3 – LINHA DE PRODUÇÃO DO MODELO FORD T



*FONTE: Incrível História (2018)*

A indústria do petróleo ganhou espaço com um lobby forte de companhias cada vez maiores. Em 1912, foi inventado o motor de arranque, o sistema de ignição elétrica que permitiu dar a partida nos motores a combustão de um jeito bem mais simples, tornando ainda mais prático os modelos movidos à gasolina.

Uma retomada do desenvolvimento de veículos elétricos teve início após medidas políticas em 1956 em Londres e Nova York para reduzir a poluição no perímetro urbano, principalmente depois que grandes concentrações de fumaça assustaram e prejudicaram a saúde da população.

Porém, o interesse diminuiu novamente após a retomada global pós crise do petróleo, pois fatores como preço de fabricação e operação e desempenho ainda eram extremamente inferiores aos modelos a gasolina. Em compensação, na década de 80, um dos principais avanços na área de tecnologia, através de John Goodenough, foi o desenvolvimento das primeiras baterias de óxido de lítio-cobalto, um dos princípios da bateria de íons de lítio, hoje principal componente de estudo entre as principais montadoras.

Como definido por Nilton Kleina (2021), o ano de 2004 acabou se tornando um marco para o mercado automobilístico: foi fundada a Tesla Motors, atualmente a maior empresa em valor de mercado do ramo. O primeiro modelo anunciado foi o Roadster, que iniciou a produção apenas em 2008, quando Elon Musk assumiu o cargo de CEO, envolvendo inicialmente produções em baixa escala, porém com a construção das estações de recarga espalhadas pelos Estados Unidos e o sonho do piloto automático.

FIGURA 1.4 – ELON MUSK, CEO DA PRINCIPAL MONTADORA DE VEÍCULOS, A TESLA



*FONTE: Super Carros (2021)*

O ano de 2008 ainda marcou a chegada da China ao setor, com destaque para empresas como a JAC, produzindo o primeiro híbrido plug-in de formato sedan e produção comercial. Finalmente, o novo gás na indústria se mostrou definitivo: as montadoras implementaram de vez os modelos híbridos ou totalmente elétricos em seu portfólio, não apenas como um conceito ou protótipo, mas comercializado em grande quantidade e, em muitas vezes, sendo o principal lançamento da marca.

Em 2017, a venda anual de carros elétricos superou a barreira de 1 milhão de unidades (AutoData, 2018) pela primeira vez, anunciando que desta vez os veículos elétricos são mais do que meras empolgações científicas ou experiências. Os modelos agora possuem desempenho muitas vezes superior à de seus concorrentes à combustão, além de terem preços competitivos.

Países, principalmente os da Europa, estão cada vez mais impondo restrições para circulação e venda de modelos a combustível, com Noruega e Reino Unido tendo os prazos mais ousados. A Alemanha também aumentou os subsídios e o fim de taxas para quem comprar um modelo elétrico.

Entretanto, mudar toda uma indústria é um grande desafio. Ainda é necessário reduzir os custos de produção e de uso dos carros, das baterias e da eletricidade. As tecnologias de autonomia também têm espaço para melhoras. Além disso, é fundamental toda uma infraestrutura para estações de carregamento, assim como hoje estão presentes os postos de combustíveis. É um caminho longo e cheio de desafios, porém os carros elétricos já estão nessa estrada há bastante tempo.

## 1.1 Motivação para o presente trabalho

O desenvolvimento de um veículo automotivo envolve diversas áreas de projeto, como dinâmica veicular, drivetrain, estrutura e chassi, pneus, refrigeração, freios e powertrain. Entretanto, um fator de influência tanto sobre o desempenho quanto o consumo energético do modelo é a aerodinâmica.

A aerodinâmica é um campo da mecânica dos fluidos responsável pelo entendimento do movimento do fluido e sua interação com um objeto sólido. No aspecto veicular, a aerodinâmica pode então ser definida como a avaliação do escoamento interno ou externo do ar nos automóveis.

Entre os principais objetivos da aerodinâmica, estão: redução do arrasto, aumento da força de downforce e minimização de ruído do vento. O arrasto é a força atuante no sentido contrário ao deslocamento do corpo e possui valor proporcional ao quadrado da velocidade relativa, e atua como resistência ao movimento, aumentando a força necessária no motor para superar essa resistência do ar. Simplificadamente, a força de *downforce*, ou sustentação negativa, é importante para pressionar o veículo para baixo, e aumentar o contato dos pneus com o solo, dando assim mais tração e desempenho em curvas e frenagem com maior capacidade e segurança. O ruído gerado pela turbulência e vórtices no escoamento de ar está associado ao conforto sonoro do passageiro durante a sua utilização.

Uma evolução mais significativa desta área, porém, ficou restrita por várias décadas devido às impossibilidades de recursos tecnológicos mais acessíveis e de maior capacidade de resolução, podendo ser citados as condições e fidelidade de túneis de vento, assim como a implementação de CFD na indústria. Outro fator determinante era a dificuldade de se produzir em grande escala geometrias e formas mais complexas devido aos processos de fabricação e materiais disponíveis para a época. Deve-se ter em mente também que os requisitos de projeto antigos deviam atender à robustez necessária para suportar o peso e todas as cargas relacionadas às péssimas condições de pistas em que se moviam. Gradativamente, estas barreiras estão sendo superadas, e os engenheiros e aerodinamicistas podem aplicar todos os seus conhecimentos e desenvolverem estudos em busca de melhorias.

Um automóvel aerodinâmico moderno possui linhas de design otimizadas e personalizadas, estudos de descolamentos do fluxo de forma estratégica, direcionadores de ar, carrocerias nas rodas, assoalhos modificados, muitas vezes com a presença de difusores, para-choques com

detalhes para a entrada de ar no sistema de arrefecimento do veículo, retrovisores com designs otimizados, até mesmo a presença de *spoilers* para redução de arrasto, entre outras inovações.

A partir deste cenário, este trabalho tem como objetivo compreender e quantificar a influência dos principais parâmetros aerodinâmicos ( $C_D$ ,  $C_l$ ,  $C_S$ ,  $C_{mox}$ ,  $C_{moy}$ ,  $C_{moz}$  e área frontal), no desempenho dos veículos automotivos elétricos. As análises foram realizadas a partir de modelos sedans de diferentes marcas e décadas de lançamento, modelando-os através de um software de CAD para em seguida obter os respectivos coeficientes em simulações virtuais de fluidodinâmica.

Por meio desses parâmetros, os desempenhos dos modelos foram avaliados através de testes de velocidades máximas atingidas, distância de frenagem, desempenho quando sob efeito de rajadas de vento laterais e a eficiência em relação ao consumo de bateria. No fim, tem-se como meta obter as correlações entre as entradas, parâmetros aerodinâmicos dos exemplares, e os resultados de desempenho em situações práticas e aplicáveis no dia a dia de utilização do carro.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo da aerodinâmica automotiva, aplicada especialmente em veículos elétricos, é recente quando comparado a outras áreas de projeto, por todos os motivos citados no capítulo anterior. Entretanto, os modelos atuais são, em sua grande maioria, o ápice das tecnologias automotivas, e possuem desenvolvimentos de designs otimizados de forma a melhorar a eficiência quanto ao consumo de bateria e, para tanto, diversas pesquisas científicas foram destinadas com esse intuito. Na sequência, são apresentados alguns artigos recentes voltados ao estudo da aerodinâmica em veículos.

Umut Aktas e Kristian Abdallah (2017) da universidade de Chalmers estudaram diferentes abordagens para reduzir o arrasto aerodinâmico. O estudo foi dividido em duas partes, a teórica, onde é feito um estudo de *benchmarking* e uma revisão da literatura, e uma parte prática onde foram escolhidos conceitos de design baseados em teoria para serem analisados em simulações CFD. Os conceitos simulados resultaram em reduções de arrasto de até 4% para os melhores casos. Esses casos correspondem a recursos aerodinâmicos ativos e são usados para atrasar a separação do fluxo na extremidade traseira de um veículo. Para concluir o estudo, mostrou-se que os desempenhos aerodinâmicos dos atuais veículos ainda não atingiram todo o seu potencial. Como diferentes conceitos foram analisados, verificou-se que com o uso de recursos aerodinâmicos o arrasto pode ser significativamente reduzido.

Em direção de estudo semelhante, Li e ZHU (2019) desenvolveram um artigo sobre otimização de design de carro elétrico que se concentra em baixo arrasto aerodinâmico. O design inicial teve uma forma ideal de baixo arrasto e, em seguida, desenvolve-se um modelo de carro real de passageiros. Com o método de fluidodinâmica computacional, e depois de várias iterações entre refinamento de design e otimização aerodinâmica, o coeficiente de arrasto (CD) resultou em 0,19, o que é bastante baixo para carros elétricos, implicando em economia de energia e aumento de autonomia.

Uma parceria entre as empresas Xitadel CAE Technologies India Private Limited e a Airshaper (2020) resultou em um estudo sobre o consumo de combustível, utilizando o software CarSim. Neste cenário, o veículo executa virtualmente o ciclo de teste de economia de combustível em rodovias da EPA. Na sequência, os coeficientes aerodinâmicos foram aumentados em 10% para ilustrar a sensibilidade do resultado final (consumo de energia da bateria/combustível) a esses

parâmetros. Aumentando os coeficientes aerodinâmicos em 10%, houve uma mudança no consumo de combustível ao longo o ciclo EPA de cerca de 5%, uma quantidade considerável.

O foco principal do trabalho desenvolvido por Afianto et al. (2022) é a análise e otimização das características aerodinâmicas de um veículo elétrico para melhorar sua eficiência, através de CFD. Múltiplas modificações de peças foram usadas para melhorar o arrasto e sustentação de um veículo hatchback elétrico. O modelo numérico do estudo foi validado usando resultados experimentais anteriores obtidos da literatura. Os resultados mostraram que modelo básico atingiu um coeficiente de arrasto aerodinâmico de 0,464, enquanto o projeto final alcançou um desempenho geral razoavelmente melhor registrando uma redução de 10% no coeficiente de arrasto. Além disso, na comparação individual com o modelo final, o segundo modelo teve uma melhoria insignificante, limitada a 1,17%, em comparação com 11,18% quando com a presença de difusor traseiro. Além disso, o coeficiente de sustentação foi significativamente reduzido para 73% do valor original, proporcionando melhor estabilidade em medidas de segurança, especialmente em alta velocidade.

Destaca-se também um artigo realizado por Wang et al. (2015), em que a equipe de avaliações do Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) conduziu testes com dinamômetros de chassi em um caminhão de entrega convencional classe 8. Um estudo quantitativo analisou os impactos de vários fatores no consumo de combustível (FC) e na economia de combustível (FE), modelando e simulando o caminhão usando o Simulador de tecnologia de sistemas automotivos do futuro da NREL (FASTSim). Os fatores incluíram o peso do veículo e os coeficientes de resistência ao rolamento e arrasto aerodinâmico. Resultados de uma simulação com um único parâmetro revelou que FC era aproximadamente linear em função do peso, coeficiente de arrasto aerodinâmico e resistência ao rolamento ao longo de vários ciclos de utilização. O estudo do impacto de duas tecnologias em FE sugeriu que, dependendo das circunstâncias, pode ser mais econômico reduzir um parâmetro (como coeficiente de arrasto aerodinâmico) para aumentar a economia de combustível, ou pode ser mais benéfico reduzir outro (como o coeficiente de rolamento resistência). Os resultados da simulação indicaram que o FC poderia ser reduzido em 38,70 L/100 km, 50,72 L/100 km e 38,42 L/100 km em um modelo de caminhão padrão.

Nota-se que os estudos apresentados tiveram como maior foco desenvolver, a partir de definições teóricas da literatura, designs otimizados com o intuito principal de reduzir o coeficiente de arrasto, com alguns projetos extrapolando essa etapa e analisando também o impacto que essa

redução na força tem no consumo de combustível. Importante ressaltar que esses estudos não avaliaram os coeficientes aerodinâmicos para diferentes ângulos de derrapagem ou quantificaram a variação dos coeficientes em relação a desempenho.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo é dedicado à apresentação de informações relevantes, definições e descrições para o desenrolar deste trabalho, de forma a relatar todo o conhecimento técnico necessário para desenvolver e compreender as pesquisas, testes e resultados do projeto.

São abordados os temas de mecânica dos fluidos, aplicada à aerodinâmica veicular, análise numérica computacional em CFD, e as equações governantes da análise dinâmica paramétrica aplicadas no estudo.

#### 3.1 Mecânica dos fluidos

Mecânica é o ramo da física que lida com movimento, energia e forças. A mecânica dos fluidos trata do comportamento dos fluidos em repouso (estática) ou em movimento (dinâmica), tendo aplicações nas áreas de propulsão, forças fluidas em estruturas, máquinas de fluxo, lubrificação, engenharia biomédica, esportes, geração de energia e na área de transportes, como o ramo veicular.

##### 3.1.1 Aerodinâmica veicular

Em termos de mecânica dos fluidos, uma área de importante estudo e atenção, que governa todos os parâmetros fundamentais para a análise aerodinâmica dos modelos veiculares, é a camada limite de escoamento turbulentos. Porém, antes de tentar compreendê-la, é necessário primeiramente entender o conceito de viscosidade.

###### 3.1.1.1 Viscosidade

Para exemplificação, será adotado um caso simples de escoamento utilizado por Atila Pantaleão Silva Freire (1990), considerando o fluxo de um fluido real que se move entre duas placas planas paralelas, com a superior a uma velocidade constante  $U$  e a inferior em repouso. Definindo o parâmetro  $h$  como a distância entre as placas, com pressão sendo constante em todo o

fluido. Os testes empíricos mostraram que o fluido adere a ambas as placas, assumindo uma distribuição linear de velocidade igual a

$$u(y) = \frac{y}{h}U \quad (3.1)$$

Para que o movimento seja conservado é necessário que se aplique uma força tangencial à placa superior que esteja em equilíbrio com as forças viscosas no fluido. Esta força foi analisada, após experimentos, ser proporcional a  $U$  e inversamente proporcional a  $h$ . A força de atrito por unidade de área, denotada por  $\tau$ , é, portanto, proporcional a  $u/h$ , o qual em geral pode ser discretizado em  $\frac{du}{dy}$ . O fator de proporcionalidade entre  $\tau$  e  $\frac{du}{dy}$  é dependente apenas da natureza do fluido e é normalmente representado por  $\mu$ . Desta forma, pode-se definir a força tangencial  $\tau$  como:

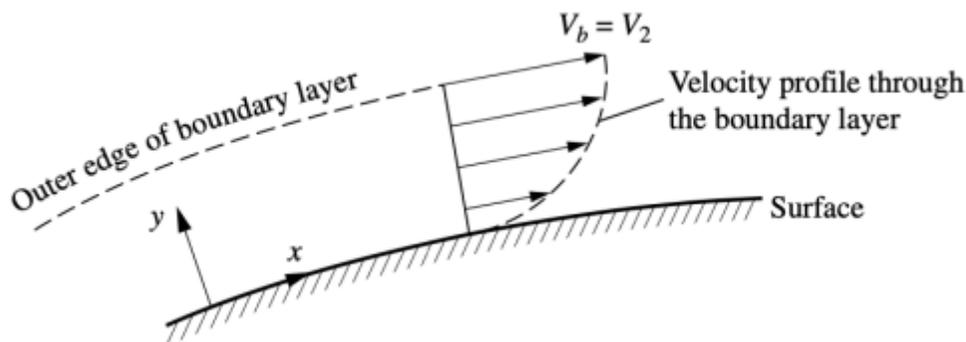
$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3.2)$$

Por fim, este fator de proporcionalidade,  $\mu$ , é chamado de viscosidade do fluido. Todo fluido que obedeça a relação acima é dito um fluido newtoniano, como o ar e a água. A viscosidade de um gás é produzida predominantemente da transferência de momento, ou seja, da transferência de quantidade de movimento entre camadas adjacentes que se movam com velocidades de módulos diferentes.

### 3.1.1.2 Camada limite

Como forma de compreender a camada limite didaticamente, assume-se uma superfície sólida inserida em um fluxo com velocidade e viscosidade constantes. Para a vasta região do campo de fluxo longe do corpo, os gradientes de velocidade são relativamente pequenos e o atrito pode ser desconsiderado. No entanto, para uma fina região do fluxo próximo à superfície, os gradientes de velocidade são grandes e o atrito começa a ter uma grande influência no fluxo, visto que o fluido imediatamente em contato com a superfície adere à mesma. Essa região viscosa adjacente ao corpo é então chamada de camada limite.

FIGURA 3.1 – PERFIL DE VELOCIDADE ATRAVÉS DE UMA CAMADA LIMITE

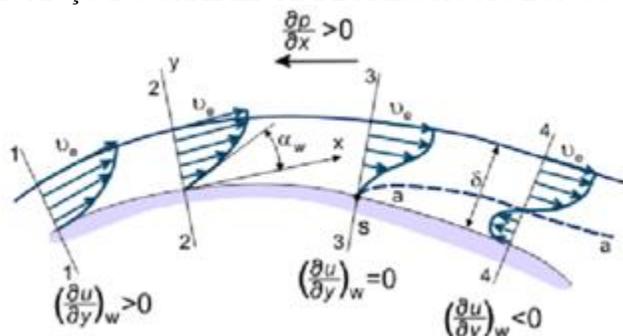


FONTE: Anderson (2011)

Devido a esse atrito, as moléculas de ar imediatamente adjacentes à superfície do corpo têm velocidade zero em relação à superfície. Isso é chamado de condição de não escorregamento e é a causa de gradientes de velocidade dentro da camada limite. A Figura 2.1 ilustra o perfil de velocidade da camada limite. Nota-se que a velocidade começa em zero na superfície, devido a condição de não escorregamento gerado pelo atrito, e aumenta gradativamente devido a viscosidade do fluido até atingir o valor de  $V_b$  na borda externa, onde  $V_b$  corresponde a 99% de  $U_\infty$ , sendo  $U_\infty$  a velocidade do fluxo livre. A distância entre a superfície sólida e essa borda é denominada como espessura da camada limite de velocidade, denotada por  $\delta$ . Para a maioria dos problemas aerodinâmicos, a camada limite é muito fina em comparação com o restante do fluxo (ANDERSON, 2001).

Após o fluxo percorrer uma certa distância da superfície, a pressão começa a aumentar na direção do fluxo. Quando essas forças de pressão se tornam maiores que as forças de inércia, o fluxo inverte sua direção. Isso tende a acontecer visto que a energia do fluxo diminui devido ao enfraquecimento das forças viscosas e, conseqüentemente, o gradiente de pressão ( $\frac{dp}{dx}$ ) torna-se maior que zero. Desta forma, a variação da velocidade em relação à dimensão vertical ao longo do corpo ( $\frac{\partial u}{\partial y}$ ) é alterada. Se o gradiente de pressão adverso é muito alto, há desaceleração do fluxo da camada limite, especialmente perto da parede, empurrando a camada limite para trás causando fluxo reverso (região de recirculação). Essa condição causa a separação do fluxo, alterando drasticamente a distribuição de pressão ao longo da superfície resultando em um grande aumento no arrasto, denominado arrasto de pressão.

FIGURA 3.2 – AVANÇO DO GRADIENTE DE PRESSÃO AO LONGO DA SUPERFÍCIE



FONTE: Josip Basic (2016)

A Figura 3.2 mostra a física do efeito descrito: a velocidade do fluxo nas regiões mais próximas do corpo é reduzida graças ao gradiente de pressão adverso, chegando a um momento quando tais velocidades invertem a direção nessas regiões, gerando redemoinhos. Esta é a visualização prática do descolamento da camada limite, que em termos gerais deve ser evitado tanto quanto possível ou, pelo menos, retardado tanto quanto possível para a aplicação automotivas.

O comportamento geral da camada limite, como a determinação do regime ou a natureza do descolamento, são determinados principalmente pela geometria do corpo que está submerso no fluxo. A partir disso, pode-se notar as características típicas geométricas de aerofólios, corpos arredondados, e qualquer outro design otimizado.

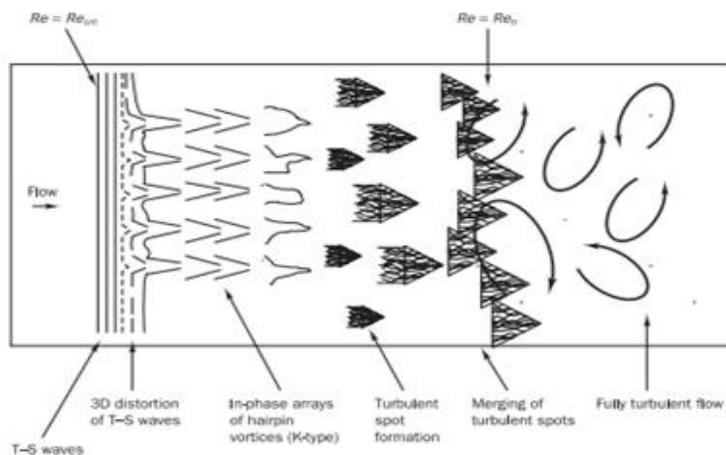
### 3.1.2.1 Conceitos fundamentais em turbulência

A causa inicial da transição para a turbulência pode ser explicada considerando a estabilidade dos fluxos laminares a pequenas perturbações. Em muitos casos, como o modelo experimental citado anteriormente, a transição para turbulência está associada com fluxos cisalhados. É de particular interesse em um contexto de engenharia a previsão do valores dos números de Reynolds  $Re_{x,crit} = \left(\frac{U_{x,crit}}{\nu}\right)$  nos quais as perturbações são amplificadas e  $Re_{x,tr} = \frac{U_{x,tr}}{\nu}$  em que a transição para fluxo totalmente turbulento acontece.

Em escoamentos com distribuição de velocidade sem ponto de inflexão, a teoria da instabilidade viscosa prevê que existe uma região finita dos números de Reynolds em torno de  $Re_\delta = 1000$  onde distúrbios infinitesimais são amplificados.

A sequência precisa de eventos é sensível ao nível de perturbação do fluxo. No entanto, se o sistema de fluxo criar condições suficientemente suaves, a instabilidade de um fluxo de camada limite para comprimentos de onda relativamente longos podem ser claramente detectadas. Um esboço dos processos que levam a transição e fluxo totalmente turbulento é dado na Figura 3.3.

FIGURA 3.3 – PROCESSO DE FORMAÇÃO DE UM ESCOAMENTO TURBULENTO



FONTE: H K Versteeg and W Malalasekera (2007)

Se o fluxo de entrada for laminar, numerosos experimentos confirmam a previsões da teoria de que a instabilidade linear inicial ocorre em torno de  $Re_{x,crit} = 91000$ . Os distúrbios bidimensionais instáveis são chamados de ondas de Tollmien–Schlichting (T–S). Esses distúrbios são amplificados na direção do escoamento (H VERSTEEG E W MALALASEKERA, 2007).

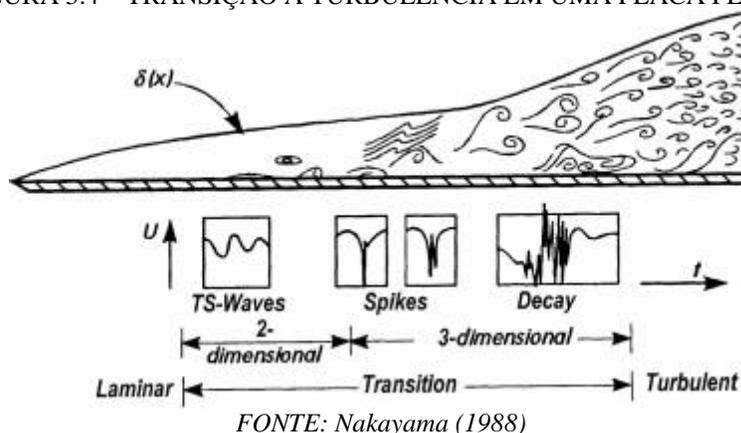
O desenvolvimento subsequente depende da amplitude das ondas na amplificação máxima (linear). Como a amplificação ocorre em um gama limitada de números de Reynolds, é possível que as ondas amplificadas sejam atenuadas mais a jusante e que o fluxo permaneça laminar. Se a amplitude é grande o suficiente, um mecanismo de instabilidade secundário, não linear, faz com que as ondas Tollmien-Schlichting se tornem tridimensionais e finalmente evoluem para vórtices  $\Lambda$  em forma de grampo de cabelo (*hairpin*). No mecanismo mais comum de transição, a chamada transição do tipo K, os vórtices hairpin estão alinhados.

Acima dos vórtices em forma de grampo, é induzida uma região de alto cisalhamento que subsequentemente se intensifica, alonga e enrola. Outras etapas do processo de transição envolve uma quebra em cascata da camada de alto cisalhamento em menores unidades com espectros de frequência de parâmetros de fluxo mensuráveis que se aproximam da aleatoriedade. Regiões de

mudanças altamente intensas ocorrem próximos à parede sólida. Pontos turbulentos triangulares explodem nesses locais. Esses pontos turbulentos são levados junto com o fluxo e crescem espalhando-se lateralmente, o que causa quantidades crescentes de fluido laminar participando do movimento turbulento.

A transição de uma camada limite natural de placa plana envolve a formação de pontos turbulentos em locais ativos e a subsequente fusão de diferentes pontos turbulentos convecionados a jusante pelo fluxo. Isso acontece em número de Reynolds  $Re_{x,tr} \approx 10^6$ . A Figura 3.4 é uma vista plana de uma camada limite de uma placa plana, ilustrando esse processo.

FIGURA 3.4 – TRANSIÇÃO À TURBULÊNCIA EM UMA PLACA PLANA



### 3.1.3 Aerodinâmica de veículos automotivos

O estudo da aerodinâmica automotiva envolve o fluxo interno e, principalmente, o externo. O movimento externo do ar, em torno de um veículo em movimento, afeta todos os seus componentes como conjunto, podendo melhorar o desempenho e o consumo de energia. Além disso, o fluxo interno direcionado à admissão e resfriamento do motor, ventilação interna, também afetam diretamente na eficiência dos componentes.

Para conhecer e avaliar as cargas aerodinâmicas, é necessário ter a distribuição de pressão gerada pelo escoamento externo do ar na superfície do veículo. Essa distribuição pode ser determinada em experimentos no túnel de vento, medindo a pressão estática com sensores em pontos específicos do carro e, em seguida, integrando essas pressões sobre a carroceria do veículo, ou através de ferramentas computacionais, como CFD. Para exemplos em túneis de vento, um

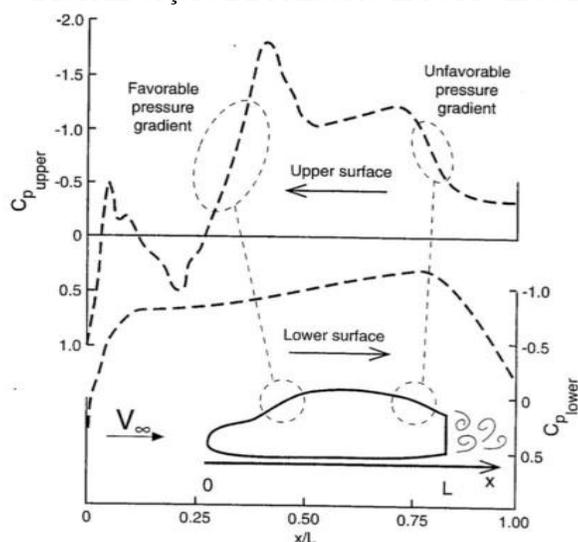
coeficiente adimensional de pressão,  $C_p$ , é utilizado, representando a diferença entre a pressão estática e a pressão na corrente livre. De forma a ser dimensional, há a divisão pela pressão dinâmica:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (3.3)$$

onde  $P$  é a pressão local e  $P_0$  é a pressão na corrente livre, adotada como referência. Para escoamento incompressível (velocidade do ar inferior a cerca de 30% da velocidade do som), valores de  $C_p > 0$  indicam que o fluxo é mais lento que  $U_\infty$ . Caso o coeficiente seja negativo, o fluxo local é mais rápido que fluxo não perturbado e  $C_p = 1$  representa um ponto de estagnação.

A Figura 3.5 mostra uma distribuição de pressão padrão sobre a forma um automóvel geral. No ponto frontal, existe um ponto de estagnação. O fluxo acelera sobre o capô e conseqüentemente, o  $C_p$  torna-se negativo. À medida que o fluxo de ar atinge o para-brisa, ele diminui novamente sua velocidade e aumenta a sua pressão. Sobre o veículo, devido ao seu formato curvilíneo, o fluxo volta a acelerar e atinge o valor mínimo de pressão. Na traseira do veículo toda a sequência é invertida, entretanto devido a dissipação pela turbulência, não há o retorno para  $C_p = 1$ , e como a pressão na parte de trás é menor do que na frente, cria-se o chamado arrasto de pressão. Na parte inferior do carro, busca-se diminuir a pressão, acelerando o fluxo próximo ao solo, criando um efeito venturi e a partir disso gerar downforce sem aumento de arrasto e outros componentes aerodinâmicos. Esse efeito foi sempre de muito estudo, pesquisa e interesse de aerodinamicistas seja na aplicação de veículos de passeio quanto modelos competitivos de alto desempenho.

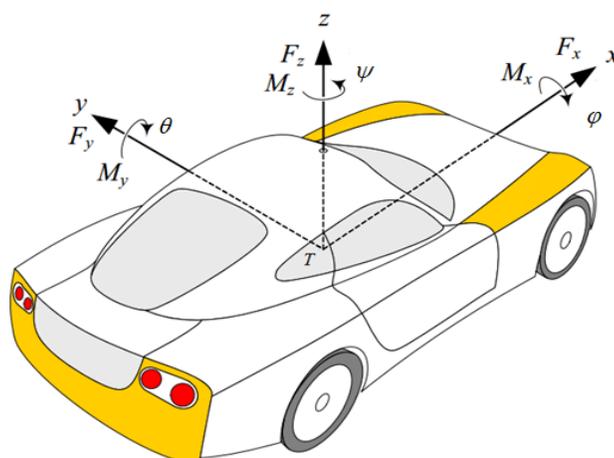
FIGURA 3.5 – DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO EM UM VEÍCULO PADRÃO



FONTE: Katz (1995)

Além da força de arrasto mencionada anteriormente, existem outras duas forças, definidas nas direções  $y$  e  $z$ , que também são resultantes do escoamento externo sobre o automóvel. O arrasto é resultante de forças de pressão e de cisalhamento aerodinâmicas que atuam no eixo longitudinal do carro, opondo-se ao seu movimento. Este é um elemento crucial do estudo da aerodinâmica e é a principal preocupação no projeto aerodinâmico de carros de passeio. Deve ser superado pela força de tração gerada pelo motor.

FIGURA 3.6 – SISTEMA DE COORDENADAS UTILIZADO NOS CARREGAMENTOS AERODINÂMICOS DE UM VEÍCULO



FONTE: Jasmin Sehovic (2016)

A sustentação é a resultante apenas das forças de pressão aerodinâmicas que atuam verticalmente, no eixo z das coordenadas globais demonstrada na Figura 3.6. A sustentação reduz as forças verticais do carro, e sua redução é a principal preocupação no estudo da aerodinâmica de carros de corrida. O oposto da sustentação é o *downforce*, que é o resultado das forças aerodinâmicas que empurram o carro para baixo, aumentando o contato dos pneus com o solo, e conseqüentemente a quantidade de força lateral que pode ser gerada por ele, melhorando o desempenho em manobras, curvas e frenagem.

*Side Force*, ou força lateral, é a resultante das forças aerodinâmicas que empurram o carro lateralmente. Esta força é gerada por ventos laterais que atuam sobre o veículo. É importante para estudos de estabilidade em carros de passeio, voltados para controle de instabilidades e segurança.

Quanto maior o peso de um carro, maior é a transferência de peso e, portanto, a força lateral produzida seria menor. Além disso, um carro mais pesado exigiria forças laterais mais altas para suportar a mesma aceleração lateral e, portanto, o benefício de cargas verticais mais altas nos pneus é perdido. Além disso, um carro mais pesado teria menos aceleração em linha reta e o efeito geral seria tempos de volta mais altos e maior consumo de combustível ou bateria. A força aerodinâmica, por outro lado, aumenta a carga vertical nos pneus sem muitas penalidades, exceto pelo arrasto induzido.

### 3.1.3.1 Coeficientes Aerodinâmicos

Os coeficientes aerodinâmicos são parâmetros adimensionais que são utilizados para o estudo aerodinâmico das forças e momentos que atuam sobre um corpo qualquer quando em movimento no ar. A adimensionalização das grandezas é realizada com o fim de aproveitar as simplificações que a análise adimensional aporta ao estudo experimental e teórico dos fenômenos físicos.

É possível definir esses coeficientes a partir em função da pressão dinâmica,  $q_\infty$ , uma área de referência,  $A$ , que para veículos, refere-se à área frontal e a própria força no eixo desejado. A pressão dinâmica é calculada pela Equação 3.4.

$$q_\infty = \frac{\rho U_\infty^2}{2} \quad (3.4)$$

O coeficiente de sustentação,  $C_l$ , é, simplificada, a relação entre a pressão de sustentação e a pressão dinâmica. A pressão na parte inferior, entre o veículo e o solo deve ser maior que a pressão na parte superior do automóvel para que haja uma elevação positiva, caso contrário, há a situação de geração de *downforce*. O  $C_l$  é então calculado por:

$$C_l = \frac{L}{q_\infty A} \quad (3.5)$$

O coeficiente de arrasto, ou coeficiente de arrasto aerodinâmico,  $C_D$ , é, como o coeficiente de sustentação, um número adimensional que quantifica a força de arrasto ou arrasto de um objeto em um meio fluido tendo em conta apenas a sua geometria. A força de arrasto ( $D$ ) pode ser definida como a expansão do coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) levando em conta a pressão dinâmica do meio ( $q_\infty$ ) e a área de referência,  $A$ .

$$C_D = \frac{D}{q_\infty A} \quad (3.6)$$

De forma semelhante, também é definido o coeficiente de força lateral,  $C_S$ , em função da força resultante aplicada  $S$ :

$$C_S = \frac{S}{q_\infty A} \quad (3.7)$$

### 3.2 Análise computacional numérica

Conforme mencionado anteriormente, um método cada vez mais prático e presente na indústria automotiva para análise aerodinâmica é a fluidodinâmica computacional, ou apenas CFD.

### 3.2.1 O que é CFD

Em âmbito geral, dinâmica de fluidos computacional ou CFD é a “análise de sistemas envolvendo fluxo de fluido, transferência de calor e fenômenos associados, como reações químicas por meio de simulação computadorizada” (H Versteeg e W Malalasekera, 2007, p.15). A técnica é muito poderosa e abrange uma ampla gama de áreas de aplicação industriais e não industriais.

A partir da década de 1960, a indústria aeroespacial implementou as técnicas de CFD nos projetos, P&D e fabricação de aeronaves e motores a jato. Mais recentemente, os métodos têm sido aplicados ao projeto de motores de combustão, câmaras de combustão de turbinas a gás e fornos. Além disso, os fabricantes de veículos motorizados agora preveem rotineiramente as forças de arrasto, fluxos de ar sob o capô e o ambiente do carro com CFD. Cada vez mais CFD está se tornando um componente vital na concepção de produtos industriais e processos.

O objetivo final dos desenvolvimentos no campo de CFD é fornecer uma capacidade comparável com outras ferramentas CAE (engenharia auxiliada por computador) como códigos de análise de tensão. A principal razão pela qual o CFD ficou para trás é a tremenda complexidade do comportamento subjacente, que impede uma descrição dos fluxos de fluido que é ao mesmo tempo econômica e suficientemente completa. A disponibilidade de hardware de computação de alto desempenho acessível e a introdução de interfaces amigáveis levaram a um recente aumento de interesse, e o CFD entrou na comunidade industrial mais amplamente desde a década de 1990.

O custo variável de um experimento em túnel de vento, em termos de aluguel de instalações e/ou custos de hora-homem, é proporcional ao número de pontos de dados e ao número de configurações testadas. Em contraste, os códigos CFD podem produzir volumes de dados de resultados extremamente grandes praticamente sem custos adicionais e torna mais viável realizar estudos paramétricos, por exemplo, para otimizar o desempenho do equipamento.

### 3.2.2 Leis de conservação de movimento e massa

Uma proposta satisfatória de modelo matemático para volumes finitos deve ser embasada nos princípios fundamentais, compreendidos pelo balanço de massa, balanço de momento linear ou Segunda Lei de Newton e balanço de energia. Esses princípios fazem parte das leis da mecânica

clássica newtoniana, que foram estabelecidas para sistemas fechados, os quais não ocorrem variação de massa ou energia no decorrer de qualquer processo físico.

A formulação diferencial representa, sobre uma partícula de fluido, balanços de qualquer informação que esteja contida e sendo transportada por um escoamento, como por exemplo: massa, quantidade de movimento linear, energia térmica e concentrações de componentes químicos.

Para o modelo matemático, a fim de descrever a física do escoamento, foram utilizadas as equações de Navier-Stokes e a equação de conservação da massa, considerando as características do fluido. Para o balanço de quantidade de movimento linear e para a equação de conservação da massa, foram considerados um meio isotérmico e o escoamento incompressível de massa específica ( $\rho$ ), sendo o fluido newtoniano de viscosidade cinemática ( $\nu$ ) com variação espacial. Essas condições podem ser observadas nas equações abaixo:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{f_i}{\rho} \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3.9)$$

As equações 3.8 e 3.9 constituem o modelo matemático fundamental para descrever o comportamento do fluido para qualquer número de Reynolds. A resolução por meio da Simulação Numérica Direta (DNS) resolve todos os efeitos de turbulência física e estruturas turbilhonares completamente. Para tanto, requer que o refinamento computacional da malha seja extremamente fino para altos números de Reynolds. Contudo, o elevado custo computacional que seria despendido para resolver todas as escalas do espectro de energia cinética para o regime turbulento, torna a resolução custosa e quase impraticável. Apresentado esse cenário, é necessário utilizar outras formulações para resolução dos modelos, como por exemplo as formulações de modelos de fechamento.

A turbulência em escoamento pode ser amplamente simulada por duas principais metodologias, a saber, Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) e Large Eddy simulation (LES). As metodologias RANS ou URANS apenas modelam os efeitos turbulentos próximos à

camada limite, sendo ineficazes na captura de estruturas de fluxo separadas na esteira turbulenta. Sendo assim, necessitam de um modelo de fechamento aplicado.

A metodologia LES, em um primeiro momento, ignora as menores escalas de comprimento, que são as mais caras computacionalmente para se resolver via filtragem passa-baixa das equações de Navier-Stokes. Essa filtragem passa-baixa, remove efetivamente informações de pequena escala da solução numérica. Entretanto essas informações não são irrelevantes e seu efeito no campo de escoamento deve ser modelado, tarefa que é uma área ativa de pesquisa para problemas em que pequenas escalas podem desempenhar um papel importante.

Dessa forma, a metodologia de solução da turbulência utilizada neste trabalho foi RANS, adotada por capturar corretamente os efeitos turbulentos na camada limite e obter médias de valores de pressões condizentes sem necessidade de malhas extremamente refinadas.

### **3.3 Análise dinâmica paramétrica**

CarSim é um software que atua como ferramenta para simular o comportamento dinâmico de veículos de passageiros ou carretas leves. Ele usa modelos dinâmicos multicorpos paramétricos 3D para reproduzir com precisão a física do veículo em resposta aos comandos do motorista e/ou de automação: direção, acelerador, frenagem e troca de marcha. As condições ambientais incluem uma superfície de solo 3D, efeitos de vento, animações de ambiente como construções, animais, pedestre, placas e sinais.

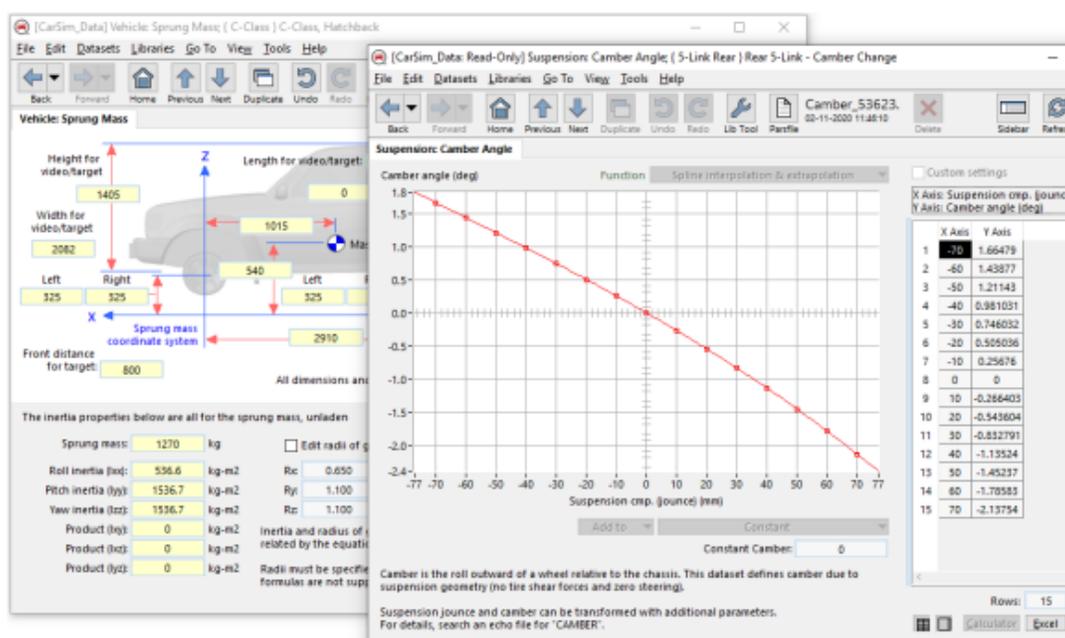
Como ferramenta, o CarSim é extensivamente validado e correlacionado com os resultados do mundo real medidos e observado por muitos OEMs (Fabricante de Equipamento Original) automotivos em todo o mundo. A tecnologia fundamental sobre a qual o CarSim é baseado é chamada de VehicleSim, abreviado como “VS” ao fazer referência a outro conteúdo no produto, por exemplo, o VS Visualizer (vídeo e plotagem) e VS Commands (linguagem de *script*).

O CarSim apresenta modelos de veículos com sistemas de alta fidelidade: os modelos matemáticos do CarSim são representados em sistemas parametrizados, o que significa que os dados do veículo podem ser medidos ou calculados e não dependem de conhecimento detalhado de materiais de componentes, complexidades de articulação de suspensão, etc. A matemática que representa o veículo é suficientemente detalhada para que a simulação possa replicar respostas medidas fisicamente dentro dos limites de repetibilidade do teste. Para isso, dados descrevendo o

veículo como cinemática e conformidade das suspensões, força do pneu e propriedades de momentos e parâmetros de pista são necessárias. No caso de dados de referência limitados, os modelos matemáticos ainda fornecem resultados representativos adequados para avaliar projetos alternativos e estratégias de controle.

O software se utiliza de uma combinação de parâmetros e variáveis para representar o veículo. Conforme mostrado na Figura 3.7, os parâmetros representam propriedades mensuráveis, como dimensões e propriedades de inércia.

FIGURA 3.7 – DADOS PARAMÉTRICOS E TABULARES UTILIZADOS NO CARSIM



FONTE: CarSim (2020)

Funções configuráveis relacionam variáveis no modelo com coeficientes lineares ou tabelas que usam uma variedade de métodos de interpolação e extrapolação. Muitas tabelas suportam os dados obtidos em bancos de ensaio de suspensão e pneus. A forma tabular também é conveniente para outras relações potencialmente não lineares que podem ser importadas de planilhas, como trajetórias de pista.

### 3.3.1 Veículo

CarSim é uma ferramenta de simulação independente que não requer nenhum outro software para ser executada. Os modelos de veículos incluem a física fundamental de multicorpos e equações de componentes de veículos (pneus, suspensões, powertrain, aerodinâmica), bem como opções de controle de ciclo aberto e fechado.

Os dados necessários para modelagem de um veículo se separam nas seguintes categorias: Massa suspensa, onde são definidas não apenas a massa suspensa e seu C.G., como dimensões do veículo. Aerodinâmica, com a implementação de informações sobre coeficientes aerodinâmicos. Powertrain, onde é modelado todos os componentes dos motores. Sistemas de freio e direção. Por fim, *datasets* destinados às configurações da suspensão e do modelo de pneus.

### 3.3.2 Aerodinâmica

Os efeitos aerodinâmicos são representados no modelo do veículo por um vetor de força atuando em um ponto na massa suspensa e um vetor de momento aplicado ao corpo da massa suspensa. Cada vetor é construído a partir de três componentes (X, Y e Z) que são paralelos aos eixos das coordenadas da massa suspensa do sistema. Os três componentes de força são definidos em termos de dois coeficientes adimensionais  $C_1$  e  $C_2$ , a área da seção transversal aerodinâmica  $A$  e a pressão dinâmica do ar  $Q$ :

$$F = C_1 \cdot C_2 \cdot A \cdot Q \quad (3.10)$$

onde  $Q$  é:

$$Q = \frac{\rho V^2}{2} \quad (3.11)$$

$\rho$  é a densidade do ar e  $V$  é a velocidade do ar em relação ao veículo.

A densidade do ar é normalmente de 1,206 kg/m<sup>3</sup>. Os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  diferem para as três direções de força. O primeiro,  $C_1$ , é uma função de ângulo de escorregamento aerodinâmico

( $\beta$ ) enquanto o outro,  $C_2$ , é uma função da altura do veículo ( $Z$ ) e ângulo de inclinação da massa suspensa ( $\theta$ ). Os coeficientes são especificados como funções tabulares (isto é, funções configuráveis) das variáveis dependentes  $\beta$ ,  $Z$  e  $\theta$ .

O ponto de aplicação das forças aerodinâmicas é o ponto de referência aerodinâmico. Os efeitos aerodinâmicos às vezes são descritos em termos de um centro de pressão, o ponto no qual nenhum momento é necessário para produzir todos os efeitos aerodinâmicos. Por convenção no setor de engenharia automotiva, no entanto, os efeitos aerodinâmicos são resolvidos em como um conjunto de forças em um ponto de referência e momentos aplicados ao corpo de massa suspensa. Conforme observado no SAE J1594, uma vantagem adicional deste ponto é a tradução direta da carga aerodinâmica para as reações ao solo da área de contato do pneu.

Da mesma forma, a forma geral da equação do momento aerodinâmico é:

$$M = C_1 \cdot C_2 \cdot A \cdot L \cdot Q \quad (3.12)$$

onde  $L$  é um comprimento de referência usado para escalar as equações de momento. Assim como nas equações de forças, os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  diferem para as três direções de momento. O primeiro coeficiente,  $C_1$ , é um função do ângulo de deslizamento aerodinâmico ( $\beta$ ) enquanto o segundo coeficiente,  $C_2$ , é uma função de ambos: altura de deslocamento do veículo ( $Z$ ) e ângulo de inclinação da massa suspensa ( $\theta$ ).

As três forças e os três momentos podem ser descritos por seis *datasets* que definem as sensibilidades dos coeficientes nas equações 3.10 e 3.12 em relação ao ângulo de escorregamento aerodinâmico. Cada uma dessas funções é representada com uma tela de biblioteca exclusiva, resumida na Tabela 1.

TABELA 1 – SUMÁRIO DA BIBLIOTECA DE AERODINÂMICA DO CARSIM

<b>Library Screen</b>	<b>Root Keyword</b>	<b>Description</b>
Aerodynamics: Fx (Drag) Coefficient	FX_AERO_SHAPING	C <sub>1</sub> coefficient for Fx
Aerodynamics: Fy (Side Force) Coefficient	FY_AERO_SHAPING	C <sub>1</sub> coefficient for Fy
Aerodynamics: Fz (Lift) Coefficient	FZ_AERO_SHAPING	C <sub>1</sub> coefficient for Fz
Aerodynamics: Mx (Roll Moment) Coefficient	MX_AERO_SHAPING	C <sub>1</sub> coefficient for Mx
Aerodynamics: My (Pitch Moment) Coefficient	MY_AERO_SHAPING	C <sub>1</sub> coefficient for My
Aerodynamics: Mz (Yaw Moment) Coefficient	MZ_AERO_SHAPING	C <sub>1</sub> coefficient for Mz
Wind Speed	WIND_SPEED	Absolute wind speed
Wind Heading	WIND_HEADING	Heading (yaw angle) of wind

*FONTE: CarSim (2022)*

A Tabela 1 também inclui duas bibliotecas usadas para definir as condições do vento: a amplitude (velocidade) e direção (rumo), onde o rumo é o ângulo de guinada do vetor de vento.

Há duas opções de configurações gerais para parâmetros aerodinâmicos. A básica é usada para a unidade principal do veículo e reboque(s) nos quais a aerodinâmica varia apenas com o ângulo de escorregamento aerodinâmico. Inclui links para as seis bibliotecas listadas na Tabela 1 que envolve o coeficiente  $C_1$  das equações 3.10 e 3.12. O coeficiente  $C_2$  nas equações 3.10 e 3.12 é definido como unitário quando esta opção é usada.

O CarSim também inclui um segundo modelo aerodinâmico mais extenso. Usando a tela Aerodinâmica: Pitch, Bounce, Yaw, as seis forças e momentos são descritos por até 12 funções configuráveis nas quais as sensibilidades dos coeficientes nas equações 3.10 e 3.12 incluem o ângulo de deslizamento aerodinâmico, a altura do percurso e o ângulo de inclinação da massa suspensa (isto é, todo o conteúdo da Tabela 1 mais o conteúdo adicional mostrado na Tabela 2).

TABELA 2 – SUMÁRIO ESTENDIDO DA BIBLIOTECA DE AERODINÂMICA DO CARSIM

Library Screen	Root Keyword	Description
Aerodynamics: Fx (Drag) Coef. Bounce/Pitch	FX_AERO_SHAPING_2	C <sub>2</sub> coefficient for Fx
Aerodynamics: Fy (Side Force) Coef. Bounce/Pitch	FY_AERO_SHAPING_2	C <sub>2</sub> coefficient for Fy
Aerodynamics: Fz (Lift) Coef. Bounce/Pitch	FZ_AERO_SHAPING_2	C <sub>2</sub> coefficient for Fz
Aerodynamics: Mx (Roll Moment) Coef. Bounce/Pitch	MX_AERO_SHAPING_2	C <sub>2</sub> coefficient for Mx
Aerodynamics: My (Pitch Moment) Coef. Bounce/Pitch	MY_AERO_SHAPING_2	C <sub>2</sub> coefficient for My
Aerodynamics: Mz (Yaw Moment) Coef. Bounce/Pitch	MZ_AERO_SHAPING_2	C <sub>2</sub> coefficient for Mz

FONTE: CarSim (2022)

### 3.3.3 Procedimentos

Para a definição dos procedimentos e testes realizados pelo veículo em estudo, também há duas possibilidades. A primeira é a partir de um conjunto de dados de procedimentos que reúne informações sobre um procedimento de teste simulado, com controles do motorista, condições de partida e parada, e outras informações que podem estar associadas a um tipo de procedimento. Uma outra opção é a por meio de um conjunto de dados de eventos que define uma ou mais condições sob as quais o procedimento de teste e/ou o veículo simulado pode ser alterado enquanto uma simulação está em andamento.

A realização de procedimentos ou eventos incluem uma definição da trajetória de pista, assim como sua animação e propriedades como atrito e resistência a rolagem, comportamento do motorista, atuação de freios e de troca de marcha, caso aplicável, assim como aplicação de esterçamento no volante. Quando é utilizado eventos, é preciso criar condições que, após serem atingidas, pode haver mudança em um dessas entradas ou até mesmo, em alguma propriedade do veículo.

Toda a criação de definição dos procedimentos envolve a utilização de parâmetros constantes, coeficientes lineares ou conjunto de dados que pode ser importado de um arquivo externo ou implementado no formato de tabelas em seus respectivos *datasets*.

## **4 METODOLOGIA**

Este capítulo é dedicado à apresentação das etapas realizadas no desenvolvimento desse estudo, envolvendo desde as escolhas dos modelos de veículos, descrevendo a modelagem da simulação numérica para obtenção dos parâmetros aerodinâmicos então aplicados no software CarSim para análises comparativas de desempenho e eficiência.

Esta seção foi dividida conforme as etapas acima citadas e de acordo com os softwares utilizados de forma a ter claramente as entradas e saídas de cada fase de desenvolvimento do projeto.

### **4.1 Modelagem em CAD 3D**

A alimentação dos dados aerodinâmicos no software de dinâmica veicular, CarSim, teve como base os valores correspondentes de modelos sedans do mercado, não apenas elétricos, representados em CAD. Foram selecionados veículos de diferentes décadas de fabricação e de diferentes montadoras, com designs variados, de forma a ser possível avaliar os impactos das inovações das geometrias e designs quando envolto em um fluxo de ar.

#### **4.1.1 Seleção dos modelos e dimensões**

A partir da ideia de seleção proposta anteriormente, os seis sedans selecionados para esse estudo foram, portanto, o Mercedes E-Klasse de 1997, o Honda Civic de 1994, a BMW E46 de 2007, o Chevrolet Cruze RS de 2017, o Audi A3 de 2020, e o Fiat Tipo de 2021.

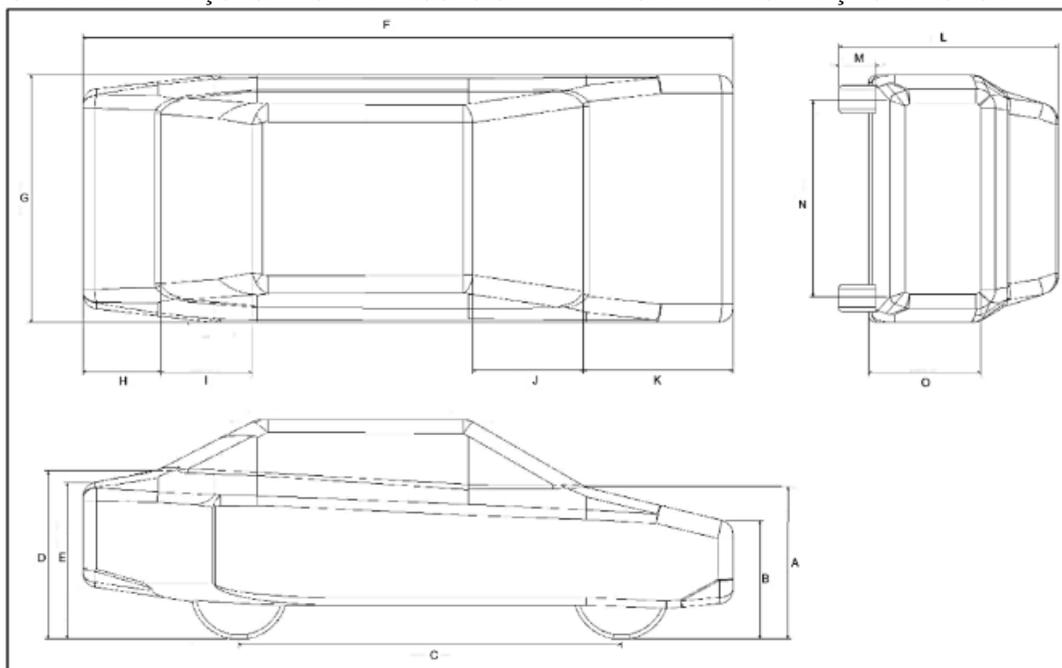
Além desses modelos, foi avaliado também um veículo sedan médio padrão construído por discentes da disciplina de Aerodinâmica de Veículos Automotivos (FEMEC43907) do 1º semestre do ano de 2018. Suas dimensões foram obtidas a partir de uma média de medidas de outros modelos de sedans atuais de mercado, conforme apresentado a seguir:

FIGURA 4.1 – COTAS DOS MODELOS PESQUISADOS PARA O VEÍCULO PADRÃO (VALORES EM mm)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Honda City	990	700	2550	1120	1060	4400	1695	500	620	800	230	1480	280	1652	400
Fiat Siena	1005	790	2373	1110	1060	4135	1615	386	593	610	240	1453	230	1400	460
Renault Logan	1080	791	2635	1196	1146	4349	1610	363	693	549	206	1509	296	1610	321
HB20S	1014	765	2500	1142	553	4230	1680	357	593	549	244	1470	248	1483	343
Cobalt	1043	880	2620	1161	1161	4481	1709	434	691	533	266	1509	296	1461	525
Prisma	1045	869	2528	1168	1144	4275	-	417	724	413	258	1478	299	1484	447
Ford Focus	995	723	2649	1081	1066	4533	1784	485	645	610	185	1465	229	1511	470
Volkswagen Voyage	1015	769	2465	1162	1101	4215	1422	400	645	554	246	1462	314	1644	427
Kia Cerato	1001	734	2700	1100	1050	4560	1780	325	595	497	201	1460	249	1528	343

FONTE: Discentes da disciplina FEMEC43907 (2018)

FIGURA 4.2 – RELAÇÕES DAS DIMENSÕES UTILIZADAS PARA A GERAÇÃO DA GEOMETRIA



FONTE: Discentes da disciplina FEMEC43907 (2018)

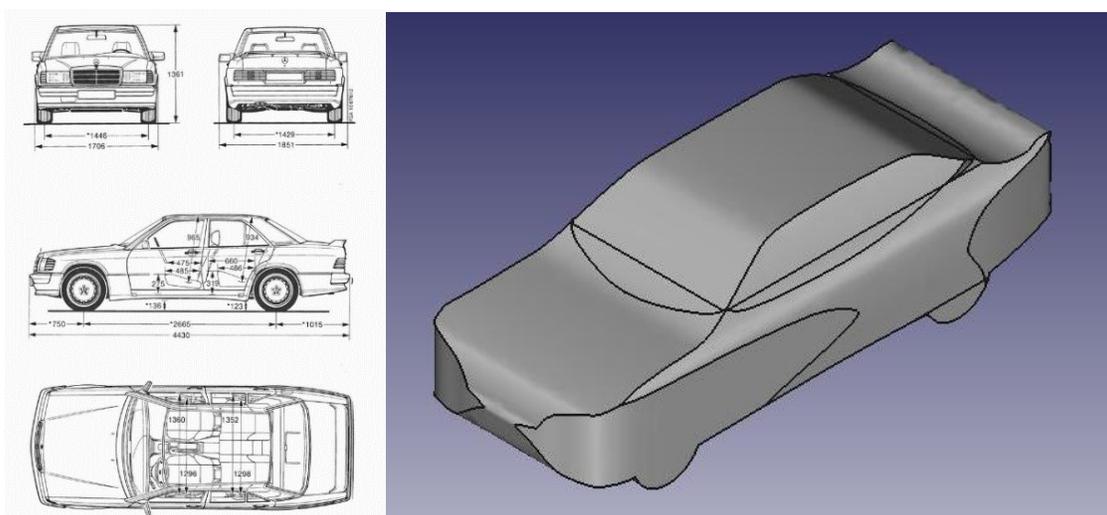
#### 4.1.2 Criação das geometrias

Para garantir a similaridade do modelo virtual tridimensional, utilizado nos testes dinâmicos virtuais, com as geometrias reais dos carros, plantas com desenhos técnicos de cada modelo nas vistas frontal, lateral e superior, com as respectivas dimensões foram utilizadas como base, para garantir as dimensões, em escala de 1:10, e a forma do veículo original. Simplificações foram propostas em detalhes menores para otimizar a modelagem, mantendo apenas as linhas e curvas características principais dos carros.

Iniciou-se a modelagem em CAD dos exemplares através do software *open source* FreeCAD®. Cada vista foi inserida em seu respectivo plano, e foram traçados os perfis externos da geometria e, em seguida, extrudados em ambas as direções simetricamente. Por fim, o design é completado através de uma operação booleana de intersecção entre essas extrusões, resultando no design final das geometrias.

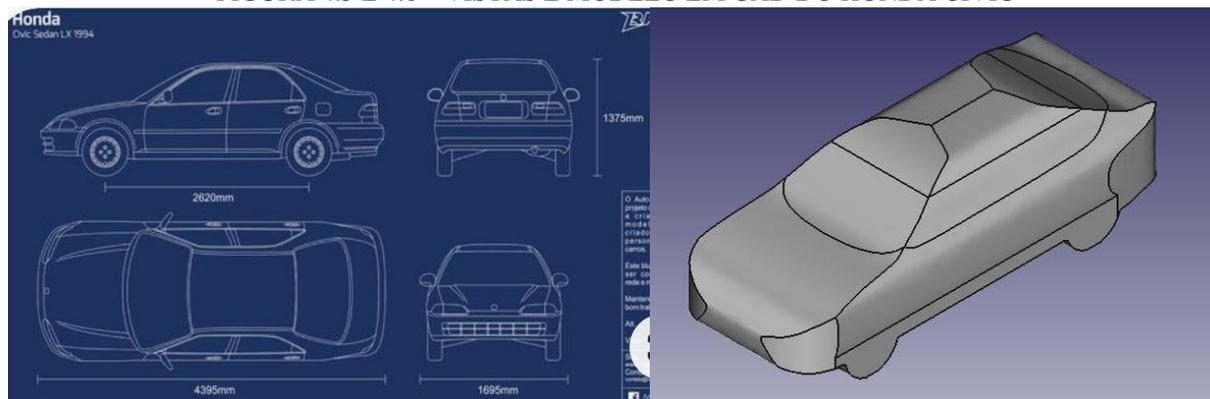
A seguir, são apresentados os resultados finais dos CADs de autoria própria com seus respectivos desenhos técnicos.

FIGURA 4.3 E 4.4 – VISTAS E MODELO EM CAD DO MERCEDES E-KLASSE



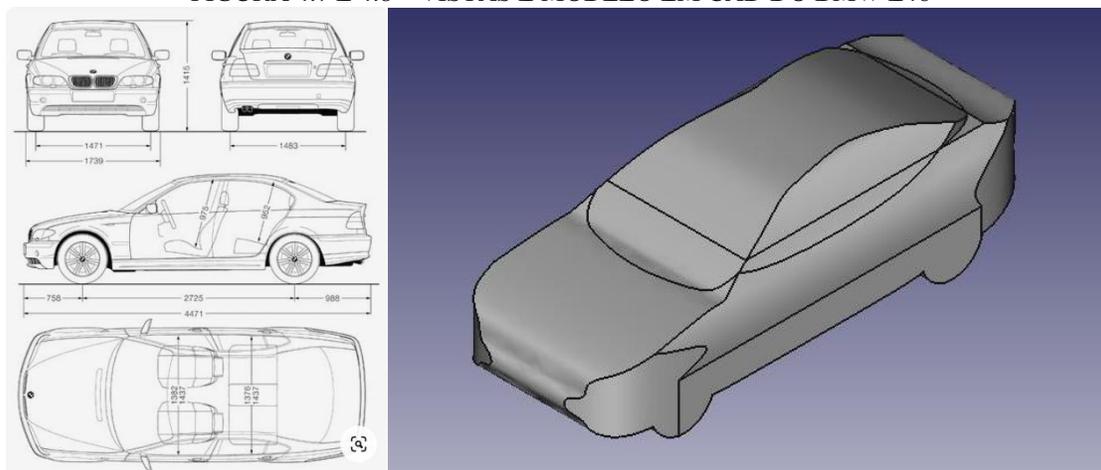
FONTE: Pinterest (2021), O autor (2022)

FIGURA 4.5 E 4.6 – VISTAS E MODELO EM CAD DO HONDA CIVIC



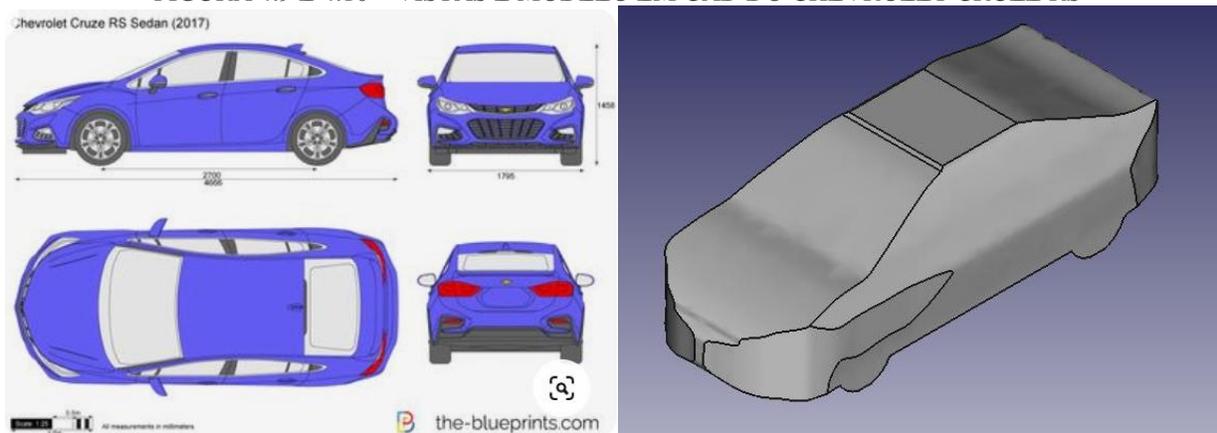
FONTE: Victor Bravo Design (2017), O autor (2022)

FIGURA 4.7 E 4.8 – VISTAS E MODELO EM CAD DO BMW E46



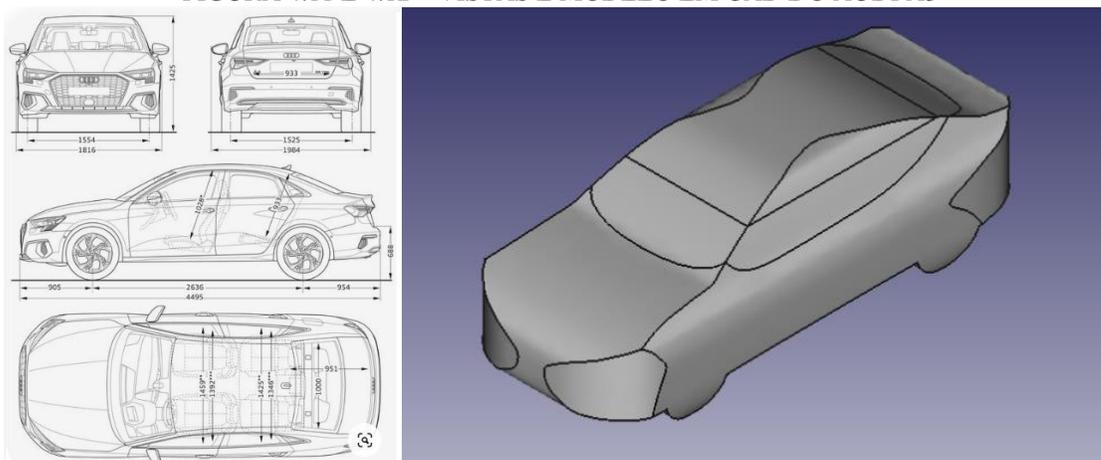
FONTE: Drawing Database (2020), O autor (2022)

FIGURA 4.9 E 4.10 – VISTAS E MODELO EM CAD DO CHEVROLET CRUZE RS



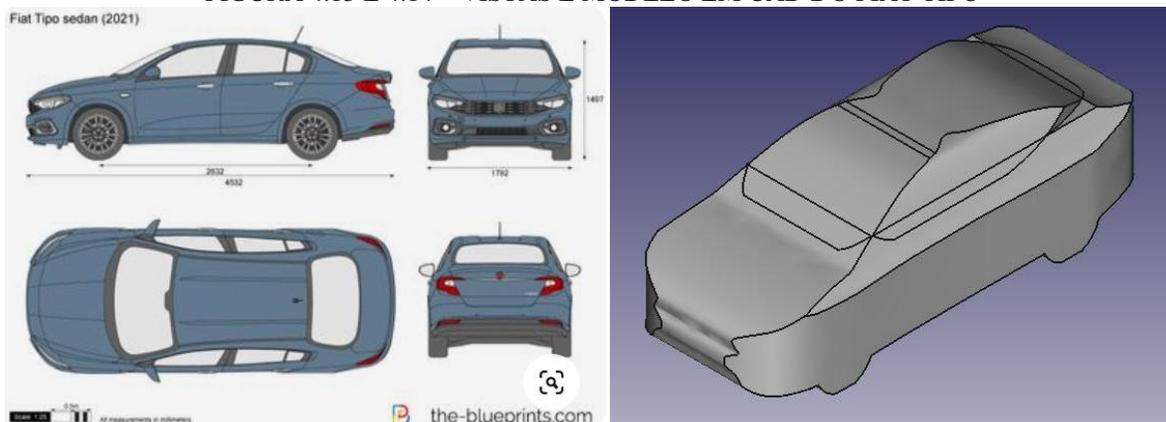
FONTE: Blueprint (2017), O autor (2022)

FIGURA 4.11 E 4.12 – VISTAS E MODELO EM CAD DO AUDI A3



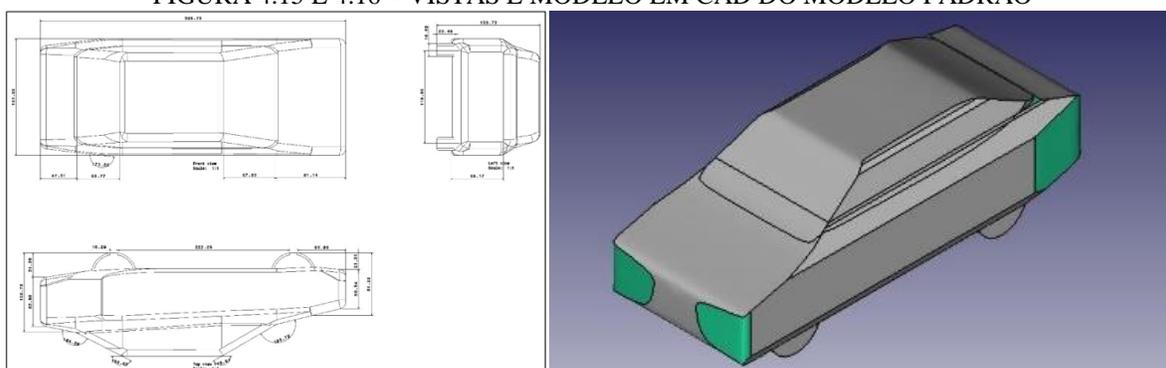
FONTE: Drawing Database (2021), O autor (2022)

FIGURA 4.13 E 4.14 – VISTAS E MODELO EM CAD DO FIAT TIPO



FONTE: Blueprints (2021), O autor (2022)

FIGURA 4.15 E 4.16 – VISTAS E MODELO EM CAD DO MODELO PADRÃO



FONTE: Discentes da disciplina FEMEC43907 (2018), O autor (2022)

As geometrias finais foram salvas e exportadas em formato .step para o software de CFD para então dar prosseguimento à obtenção dos coeficientes aerodinâmicos.

## 4.2 Simulação CFD

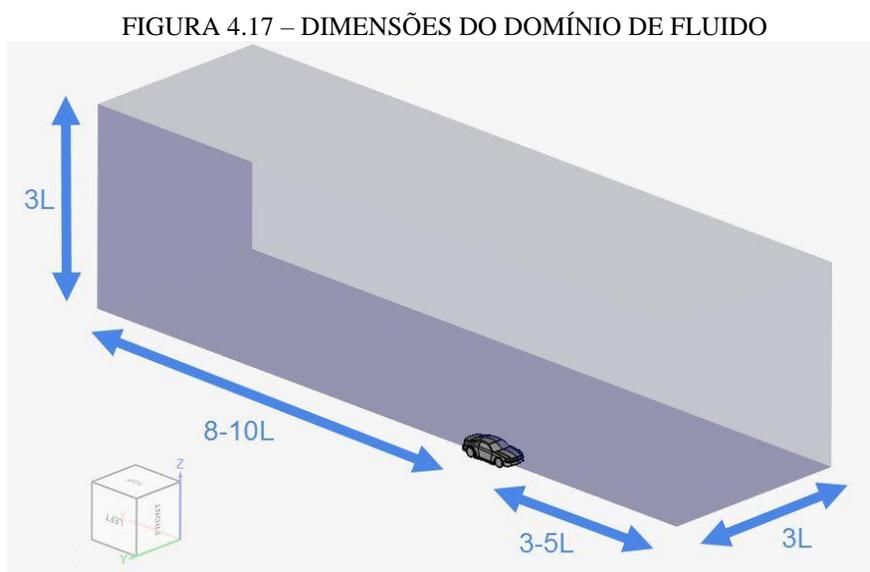
Definidos e construídos os exemplares virtuais de veículos, teve início a etapa de análise fluidodinâmica, onde foi estudado o comportamento, relativo a forças e momentos, dos carros quando em movimento. Para realizar esta análise, foi necessário preparar previamente o modelo para ser solucionado via método dos volumes finitos. Todo este processo, de preparação e solução, foi realizado através do software Workbench do Ansys® na sua versão estudantil, versão 2022 R2.

Como resultados, pôde-se não só visualizar as trajetórias do escoamento sobre o corpo, como também identificar e mensurar o campo de pressão sobre a superfícies do modelo e, a partir disso, obter os valores dos coeficientes aerodinâmicos de forças e momentos em cada modelo.

#### 4.2.1 Geometria

A geometria para utilização em uma análise CFD requer preparos especiais. Isso porque é necessário definir a região onde ocorre o escoamento de ar, também conhecido como domínio do fluido. Para tal, o processo de preparo da geometria ocorreu no software DesignModeler, a partir do Workbench.

É importado os arquivos CAD .step dos veículos finalizados na etapa anterior. Para a criação do domínio de fluido, foi realizada uma operação de “*enclosure*” em formato de caixa ao redor do veículo, tendo suas dimensões definidas a partir da literatura apresentada a seguir:



FONTE: Simscale (2022)

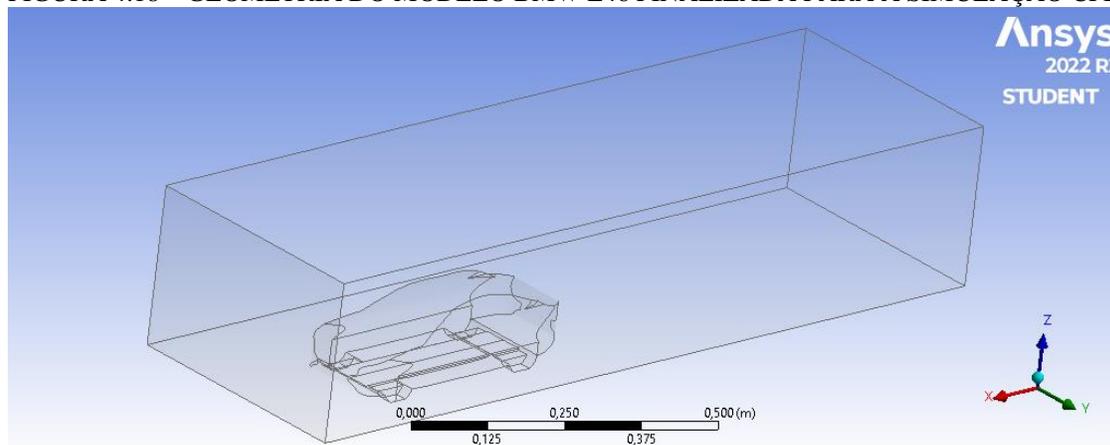
Essas dimensões são necessárias de forma a evitar que os parâmetros definidos como condições de contorno em cada face do domínio influenciem incorretamente no escoamento, trazendo interferências inexistentes em um escoamento real.

Após a criação do domínio, é realizada uma operação booleana de subtração entre a caixa e o corpo do veículo, de forma a resultar na geometria final apenas a região de fluido.

A relação entre tamanho do domínio do escoamento com o número de nós e elementos é, em sua grande maioria, proporcional ao custo computacional, ou seja, maior tempo de resolução da simulação. Entretanto, apesar da simetria da geometria dos veículos, não foi realizado o corte no eixo xz para que apenas um lado do escoamento fosse simulado, pois não há simetria entre as condições de contorno quando o ângulo de incidência do escoamento (ângulo de deslizamento) for diferente de zero. Além disso, foram criadas diferentes dimensões de domínio para acomodar a esteira do escoamento para os diferentes *slip angles* aplicados.

Outro ponto a se considerar é que, devido a utilização da versão estudantil, foi necessário reduzir as dimensões propostas pela literatura para o domínio para não extrapolar a quantidade de elementos de malha disponíveis a serem utilizados. Desta forma, finaliza-se a preparação da geometria com o domínio do fluido a ser estudado definido, podendo então ser exportado para o software responsável pela geração de malha.

FIGURA 4.18 – GEOMETRIA DO MODELO BMW E46 FINALIZADA PARA A SIMULAÇÃO CFD



FONTE: O Autor (2022)

#### 4.2.2 Geração de malha

Finalizada a etapa de preparação da geometria, deu-se prosseguimento à geração de malha para resolução das equações de volumes finitos. A malhagem foi realizada no software Mesh Fluent. Importou-se as geometrias resultantes de cada modelo de veículo do DesignModeler.

Como etapa inicial, selecionou-se o método de discretização como elementos tetraédricos, devido a facilidade de geração de malha, rapidez e capacidade de se adequar a geometria complexas, como no caso desse estudo.

Ponto de extrema importância para a correta predição do escoamento e no cálculo das forças e pressões resultantes, é a correta modelagem da malha na camada limite sobre a superfície do veículo. Para tanto, é necessário criar camadas de elementos hexaédricos próximo às superfícies. Elementos hexaédricos é recomendado neste caso, apesar de seu maior custo e dificuldade de geração, pois possuem arestas alinhadas com a trajetória do fluido, e, portanto, não há perdas de informação devido a decomposição de velocidades e pressões em cada eixo. Entretanto é necessário ter esses elementos com espessuras adequadas, definida a partir do parâmetro adimensional de  $y^+$ .

O parâmetro  $y^+$  é definido de acordo com o modelo de turbulência a ser utilizado na simulação, velocidade do escoamento, viscosidade e densidade do fluido e dimensão do corpo, então calculado por

$$y^+ = \frac{yu_r}{\nu} \quad (4.1)$$

Sendo  $u_r$  a velocidade de atrito,  $y$  a distância absoluta da parede, e  $\nu$  a viscosidade cinemática. Para a o modelo K-omega SST utilizado, onde será explicado sua utilização posteriormente, o valor de  $y^+$  é definido como 1, ou seja, possui uma distância menor até a superfície, permitindo dessa forma resolver com maior precisão os gradientes de velocidade e pressão na região da camada limite. Dessa forma, define-se a distancia  $y$  entre o primeiro elemento da camada limite até a superfície da seguinte maneira:

$$y = \frac{y^+ \mu_f}{\rho u_{\mathcal{T}}} \quad (4.2)$$

Sendo,

$$u_{\mathcal{T}} = \sqrt{\frac{\mathcal{T}_w}{\rho}} \quad (4.3)$$

E,

$$\mathcal{T}_w = 0,5 * C_f * \rho * U_\infty^2 \quad (4.4)$$

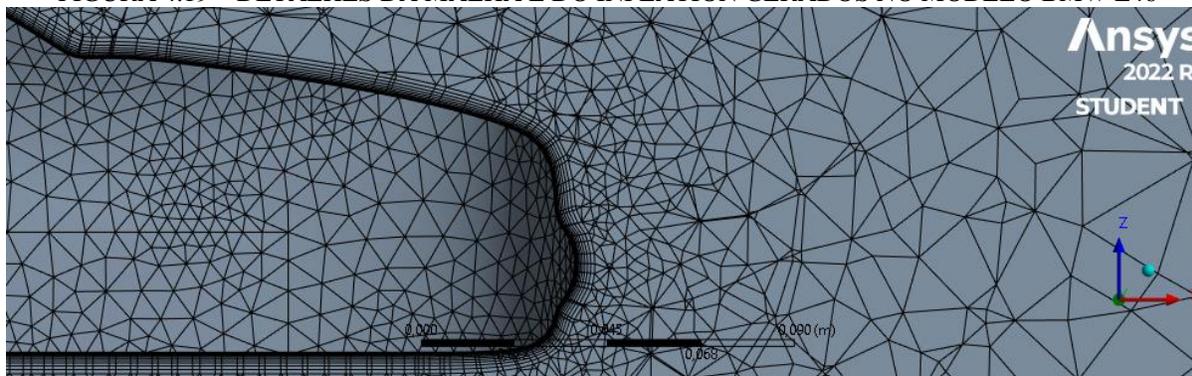
Por fim,

$$C_f = \frac{0,026}{R_e^{\frac{1}{7}}} \quad (4.5)$$

Portanto, através dessa formulação, retorna-se a espessura da primeira camada de elementos acima da superfície do corpo, que ficou definido em 0,2 mm, de forma a atender todos os modelos.

Conforme recomendado em literaturas como boas práticas, definiu-se em dez camadas para o *inflation* (elementos hexaédricos na camada limite), com uma taxa de crescimento entre elementos de 1,2, de forma a não ter grandes variações de propriedades entre um elemento e seu adjacente. Essa taxa também foi aplicada em todo o modelo.

FIGURA 4.19 – DETALHES DA MALHA E DO INFLATION GERADOS NO MODELO BMW E46



FONTE: O autor (2022)

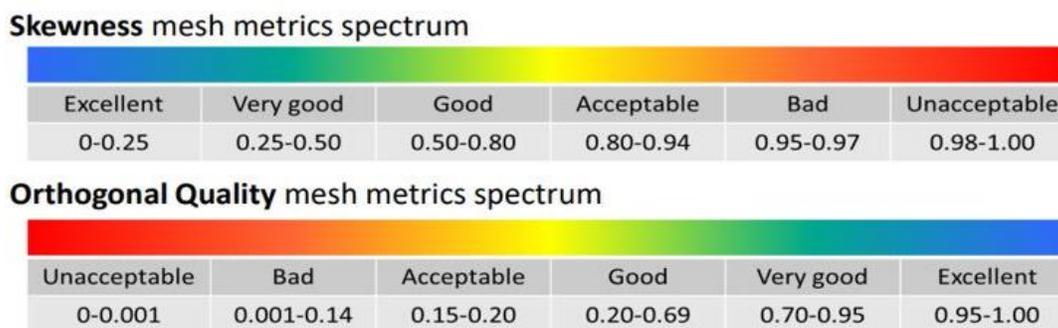
Devido a utilização da versão estudantil do software, há uma restrição limite de 512 mil nós ou elementos na malha, por isso o tamanho dos elementos teve seu valor definido em 0,4 m, valor aplicado em elementos mais distantes das superfícies do veículo.

Por fim, para averiguar a qualidade da malha e tentar conseguir prever a convergência da simulação, dois principais indicadores são avaliados: *skewness* (assimetria) e *orthogonal quality* (ortogonalidade). *Skewness* determina o quão perto do ideal, ou seja, equilátero ou equiangular uma face ou célula é. De acordo com a definição de assimetria, um valor de 0 indica uma célula

equilátera (melhor) e um valor de 1 indica um elemento completamente degenerado (pior). Elementos degenerados são caracterizados por nós que são quase coplanares ou colineares em 2D (ANSYS Inc., 2008). O conceito de ortogonalidade da malha se refere ao desvio do ângulo entre o vetor que conecta o centro dos volumes adjacentes e o vetor normal à superfície entre eles. A ocorrência de não-ortogonalidade afeta a acurácia da aproximação numérica dos fluxos, em especial a discretização do operador gradiente. Malhas com alta não ortogonalidade podem sofrer com a difusão numérica de erros na solução do problema (AVRAHAM, 2019).

Abaixo são apresentados os espectros de qualidade para esses dois parâmetros, conforme documentação do software Ansys.

FIGURA 4.20 – ESPECTRO DE QUALIDADE DOS PARÂMETROS DE *SKEWNESS* E ORTOGONALIDADE



FONTE: Documentação Ansys (2022)

Para esse estudo, todas as malhas geradas permanecerem com esses parâmetros de qualidade nas faixas de aceitáveis, visto a dificuldade de refinamento de malha devido ao limite de nós e elementos, porém suficientes para não gerar divergência na resolução das equações durante a simulação.

### 4.2.3 Configurações da simulação

Concluída a etapa anterior, importou-se a malha para o Fluent, software responsável pela interface de pré-processamento da simulação fluidodinâmica e *solver*, configurando a máquina para utilizar quatro processadores para maior rapidez de simulação e precisão dupla.

Através da interface, em sua tela inicial, em definições gerais, ativou-se as opções de *solver* baseado na pressão e ser uma solução em regime permanente (*steady-state*). Na aba de físicas, introduziu-se ao modelo os principais parâmetros do escoamento e das condições de contorno da

simulação. A pressão de operação foi mantida no padrão do Ansys, de valor 101,325 kPa. Em valores de referência, definiu-se a velocidade de referência em 1 m/s, e a área de referência foi obtida pela projeção frontal de cada modelo de veículo, sendo assim o único parâmetro variável entre os exemplos. Importante mencionar que essa baixa velocidade foi utilizada para reduzir a esteira de fluxo após o veículo de forma a ser possível reduzir o domínio fluido, visto a limitação de quantidade de elementos de malha.

FIGURA 4.21 – VALORES DE REFERÊNCIA UTILIZADOS NO MODELO BMW E46

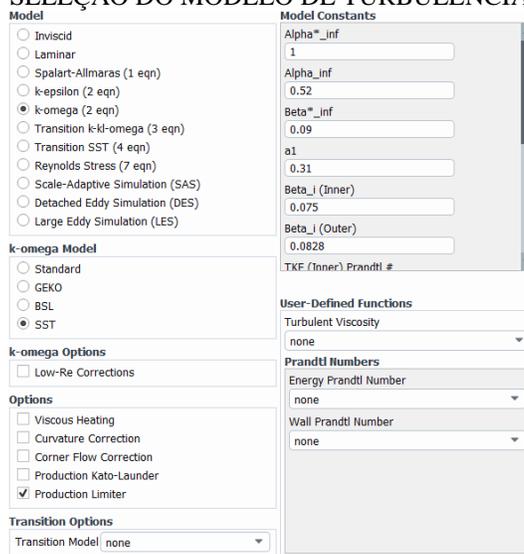
Reference Values	
Area [m <sup>2</sup> ]	0.01982409
Density [kg/m <sup>3</sup> ]	1.225
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	0.45
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	288.16
Velocity [m/s]	1
Viscosity [kg/(m s)]	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

FONTE: O autor (2022)

Na aba de modelos, ativou-se a equação de energia para ser adicionada à resolução. No campo de *viscous*, definiu-se o modelo de turbulência como k-omega (2 eqn) SST. O modelo de turbulência k-omega SST é um modelo de viscosidade turbulenta de duas equações que se tornou muito popular. A formulação do transporte de tensão de cisalhamento (SST) combina o melhor dos dois mundos. O uso de uma formulação k-omega nas partes internas da camada limite torna o modelo diretamente utilizável até a parede através da subcamada viscosa, portanto, o modelo k-omega SST pode ser usado como um modelo de turbulência de Baixo Reynolds sem quaisquer funções extras de amortecimento.

A formulação SST também muda para um comportamento k-epsilon no fluxo livre e, assim, evita o problema k-omega comum de que o modelo é muito sensível às propriedades de turbulência do fluxo livre de entrada. Os autores que usam o modelo k-omega SST geralmente o utilizam por seu bom comportamento em gradientes de pressão adversos e fluxo de separação. O modelo k-omega SST produz níveis de turbulência um pouco grandes demais em regiões com grande deformação normal, como regiões de estagnação e regiões com forte aceleração. Esta tendência é muito menos pronunciada do que com um modelo k-epsilon normal (Menter, 1993).

FIGURA 4.22 – SELEÇÃO DO MODELO DE TURBULÊNCIA K-OMEGA SST

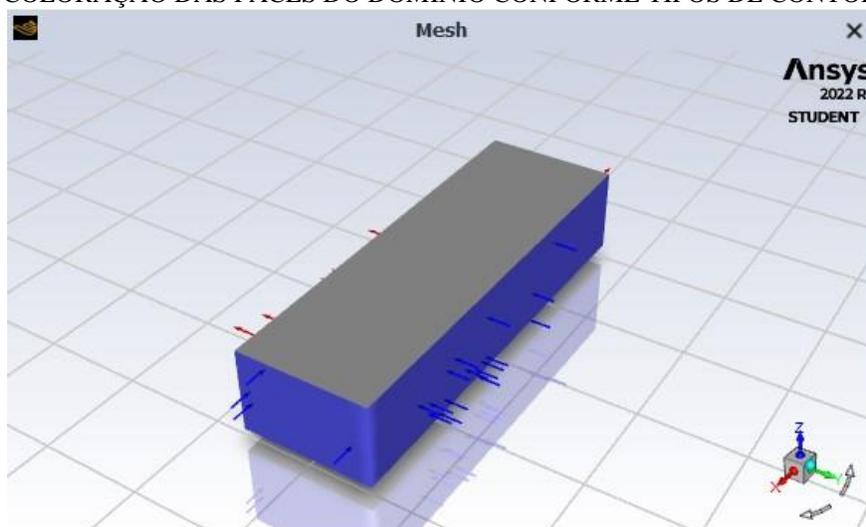


FONTE: O autor (2022)

Em materiais, devido à baixa velocidade resultando em um escoamento incompressível, aplicou-se as propriedades de densidade e viscosidade padrões constantes para o ar oriundas da biblioteca do Ansys.

Na sequência, foi realizada a etapa de aplicação das condições de contorno. Nas faces determinadas como *inlet* (entrada do escoamento), na coloração azul na Figura 4.23,

FIGURA 4.23 – COLORAÇÃO DAS FACES DO DOMÍNIO CONFORME TIPOS DE CONTORNO DEFINIDOS



FONTE: O autor (2022)

definiu-se como face de entrada do fluido do tipo *velocity-inlet*, com velocidade e distribuição constante de 1 m/s em valor absoluto, visto que o vetor inserido em cada eixo ficou de acordo para atingir com os *slip angle* de 0°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90°. O solo é definido como *moving wall*, ou seja, é do tipo parede, entretanto é aplicado uma velocidade constante, representando uma esteira na simulação, visto que o veículo está parado e é o ar e o solo que se movem relativamente. O *outlet* (saída do fluxo do domínio), na coloração vermelha da Figura 4.23, foi definido como *pressure outlet* com fator de multiplicação 1.

As leis de paredes, em cinza, foram definidas como *slipwalls*, com *specified shear* de 0 Pa em todas as três direções. O método de acoplamento de pressão-velocidade foi definido como *coupled* e discretização de segunda ordem em todos os elementos. Por fim, foram definidas a finalização da simulação em 400 iterações ou convergência de  $10^{-4}$  dos resíduos.

FIGURA 4.24 – DEFINIÇÃO DO CRITÉRIO DA CONVERGÊNCIA DOS RESÍDUOS

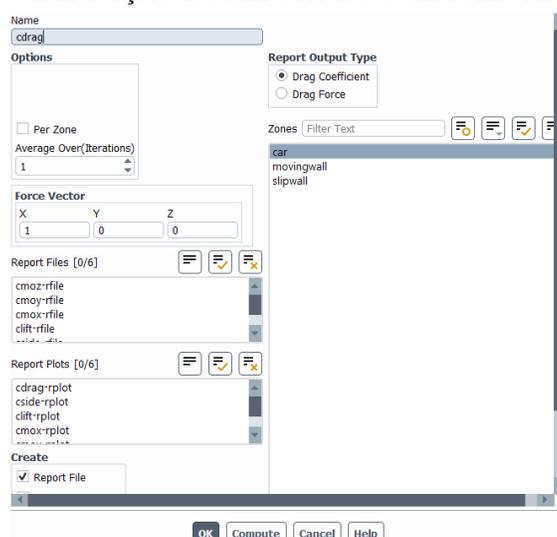
Equations			
Residual	Monitor	Check Convergence	Absolute Criteria
continuity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0001
x-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0001
y-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0001
z-velocity	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0001
energy	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1e-06
k	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0001
omega	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	0.0001

FONTE: O autor (2022)

#### 4.2.4 Obtenção dos resultados

A criação de *outputs* da simulação são os próprios coeficientes aerodinâmicos, também utilizados nesta etapa como avaliador de convergência da simulação. Tabelas com os resultados foram criados a partir de *reports* dos coeficientes das forças nas três direções, arrasto em x, força lateral em y e sustentação em z, e coeficientes de momentos também nessas três direções.

FIGURA 4.25 – DEFINIÇÃO DO REPORT DO COEFICIENTE DE ARRASTO



FONTE: O autor (2022)

Além dos arquivos com os dados dos coeficientes, no software Ansys ainda é possível fazer o pós-processamento da simulação para observar o escoamento através do veículo, verificar as zonas de pressão, turbulência, velocidade, etc.

### 4.3 Configurações de análises dinâmicas com CarSim

As etapas de configuração no software CarSim envolvem desde a modelagem de um veículo sedan elétrico, com a implementação das curvas dos coeficientes aerodinâmicos obtidos na seção anterior via CFD, a criação de pistas, eventos e procedimentos de forma a avaliar o desempenho dos veículos em diferentes situações e preparar *plot definitions* de forma a retornar os principais indicadores para cada procedimento.

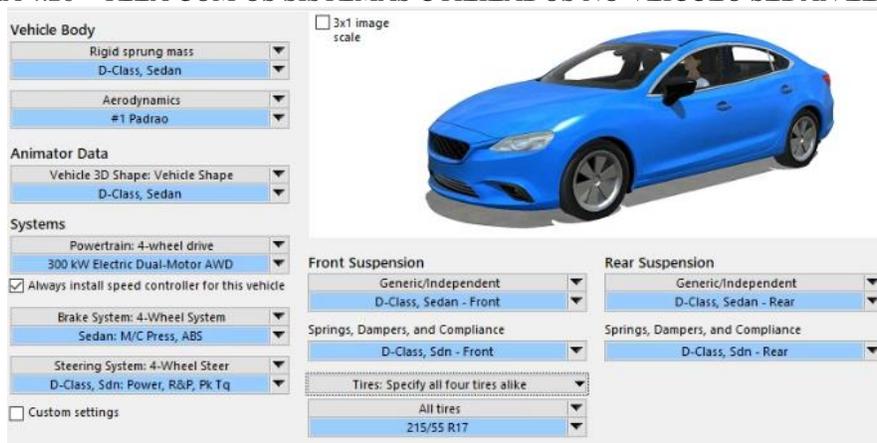
#### 4.3.1 Veículo

O veículo modelado para este projeto foi obtido da biblioteca de veículos da Mechanical Simulation. Essa biblioteca é baseada em diversos modelos do mercado e possuem uma grande representatividade com modelos atuais, por isso sua utilização pode ser aplicada sem qualquer descolamento dos parâmetros reais dos veículos. Parâmetros de dimensão, massa suspensa, não-

suspensa e total, suspensão dianteira e traseira, freio e sistema de direção foram mantidos como padrão e iguais em todos, pois não são o foco desse estudo.

Antes da implementação dos datasets da área de aerodinâmica, alterou-se o modelo de powertrain para um dataset elétrico também da biblioteca. Neste caso, o modelo escolhido foi um sistema elétrico de dois motores AWD (all wheel drive), totalizando 300 kW de potência, valor médio de potência fornecido por veículos elétricos comerciais atuais.

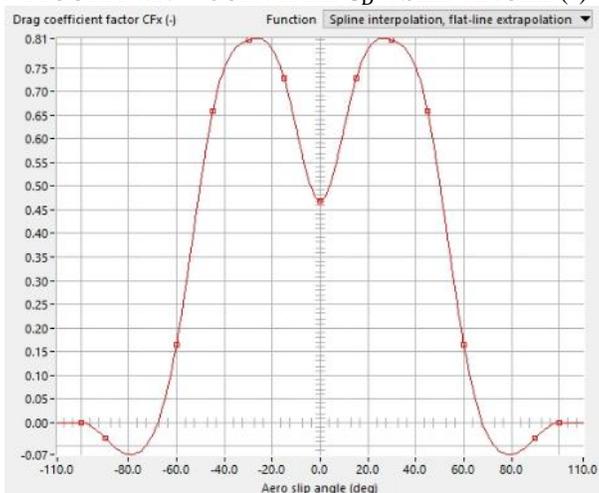
FIGURA 4.26 – TELA COM OS SISTEMAS UTILIZADOS NO VEÍCULO SEDAN ELÉTRICO



FONTE: O autor (2022)

### 4.3.2 Implementação dos coeficientes

O modelo aerodinâmico utilizado foi a opção básica do software, em que os coeficientes são dependentes apenas do *slip angle*, visto que não havia informação quanto às outras propriedades da opção estendida. Conforme mostrado na imagem abaixo, dentro da categoria de aerodinâmica há seis *datasets*, ou conjunto de dados, relativos a coeficientes de forças e momentos. Neste conjunto de dados, são implementados os valores obtidos no Ansys em tabelas de *Slip Angle* x Coeficiente, conforme exemplo abaixo para o coeficiente de arrasto.

FIGURA 4.27 – CURVA DE  $C_D$  x SLIP ANGLE (°)

FONTE: O autor (2022)

Abaixo, é demonstrado a tela para o veículo padrão a criação dos seis datasets criados especificamente para o modelo em cada coeficiente.

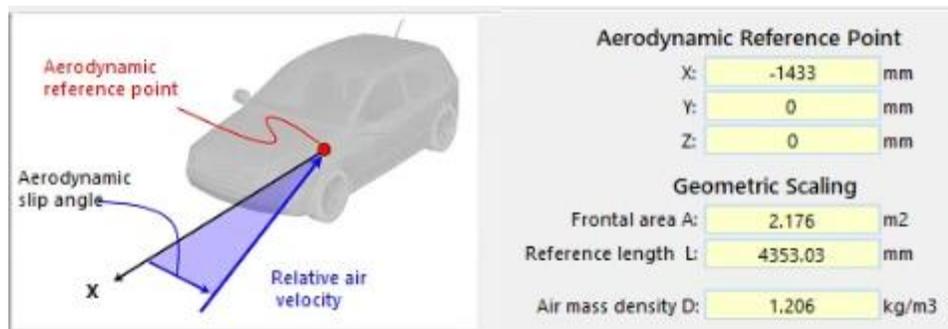
FIGURA 4.28 – DATASETS COM OS COEFICIENTES AERODINÂMICOS



FONTE: O autor (2022)

Como última etapa da modelagem aerodinâmica, implementou a cada modelo a área frontal obtida através da projeção no Ansys e o comprimento de referência  $L$  oriundo das plantas dos carros. Parâmetros como ponto de referência e densidade do ar foram mantidos constantes e padrões em todos os casos, de forma a ser apenas os coeficientes aerodinâmicos e a área frontal como fatores determinantes nas diferenças entre resultados de desempenho.

FIGURA 4.29 – TELA DO CARSIM COM OUTROS PARÂMETROS AERODINÂMICOS



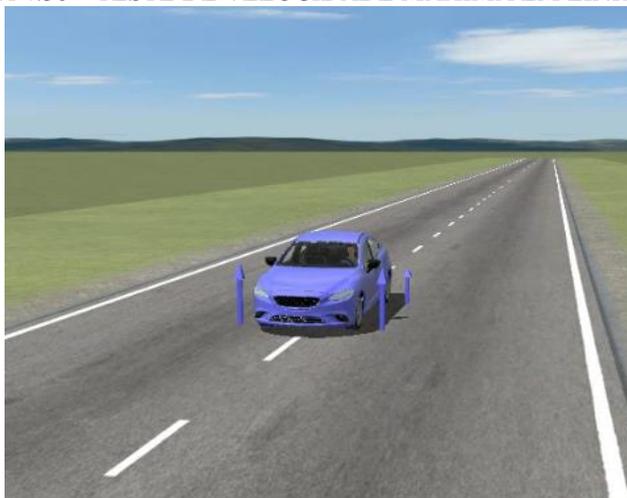
FONTE: CarSim (2022)

### 4.3.3 Procedimentos

Os procedimentos são testes criados de forma a aplicar o veículo em uma condição específica. Para a realização de um procedimento é necessário definir parâmetros de aceleração e velocidade, frenagem e esterçamento do volante em função do tempo. Além disso, é definida a trajetória percorrida pelo veículo, condições de pista como resistência a rolagem, elevações e rugosidade e possíveis eventos externos, como a adição de ventos laterais.

A primeira análise de desempenho foi o teste de velocidade máxima, cujo objetivo é quantificar o impacto do coeficiente de arrasto em altas velocidades. Para isso, foi criada uma pista reta em que é aplicada 100% de aceleração nos pedais do veículo até atingir o valor limite de velocidade, equilibrado entre as forças geradas pelo motor elétrico e o arrasto aerodinâmico.

FIGURA 4.30 – TESTE DE VELOCIDADE MÁXIMA EM LINHA RETA

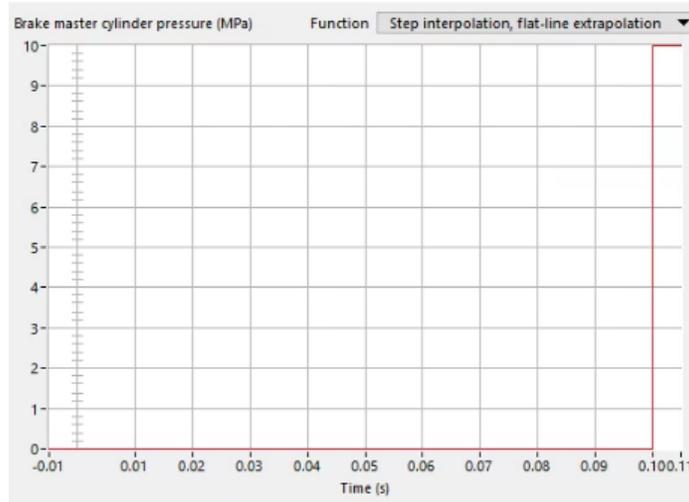


FONTE: O autor (2022)

Uma segunda análise foi realizada de forma a avaliar o desempenho de frenagem dos modelos, iniciando o processo em 120 km/h, e então uma entrada do tipo degrau é aplicada nos freios, no valor de 10MPa. No quesito aerodinâmico, com este teste é possível avaliar não apenas como o arrasto auxilia a frenagem, como o downforce impacta no desempenho dos pneus em contato com o solo na frenagem.

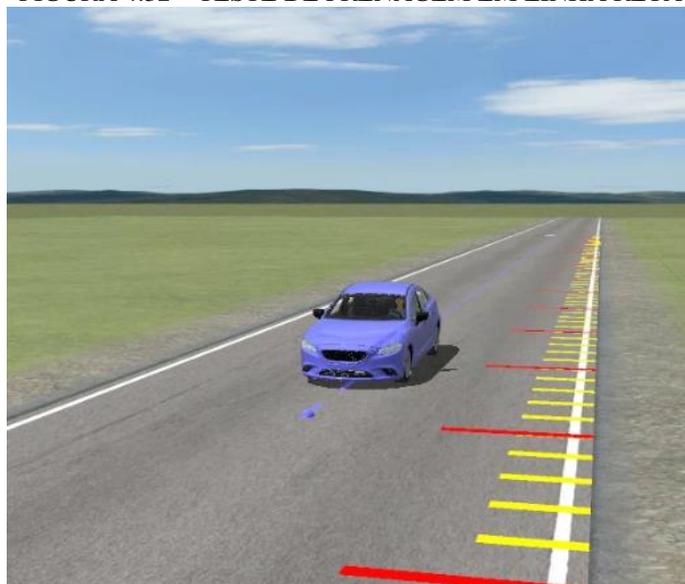
Abaixo é demonstrada a entrada nos pedais de freio e a pista com marcações para retornar a distância necessária para frenagem.

FIGURA 4.31 – CONTROLE DE PRESSÃO APLICADA NO CILINDRO MESTRE DOS FREIOS



*FONTE: O autor (2022)*

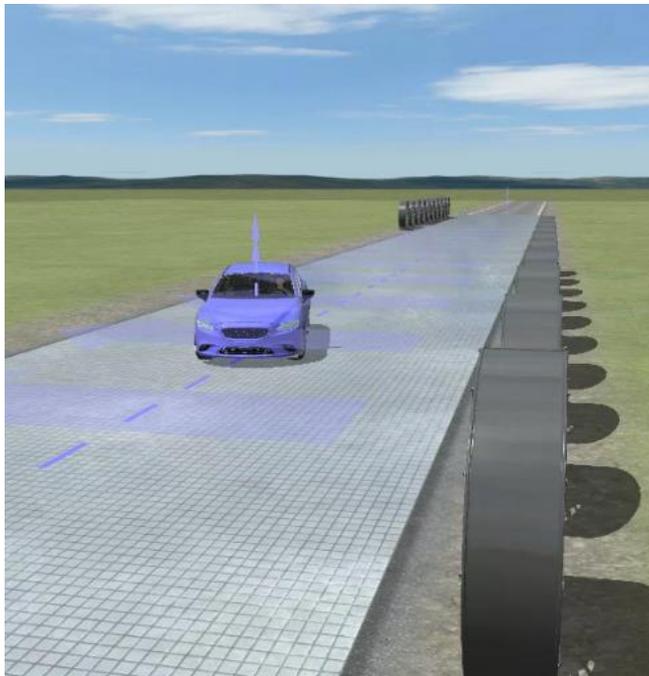
FIGURA 4.32 – TESTE DE FRENAGEM EM LINHA RETA



*FONTE: O autor (2022)*

O teste de *Crosswind*, ou vento de través, é utilizado para avaliar o comportamento do veículo quando sujeito a rajadas de ventos laterais, seja por condições climáticas ou situações em áreas urbanas, resultando em forças laterais, as *side forces*. Os ventos são inseridos através de ventiladores instalados ao longo de 30 metros de cada lado, gerando ventos de 100 km/h. Para amplificação das reações, foi utilizado uma pista de asfalto de baixa fricção, no valor de  $\mu = 0,2$ .

FIGURA 4.33 – TESTE DE CROSSWIND SOBRE PISTA DE BAIXA FRICÇÃO



FONTE: O autor (2022)

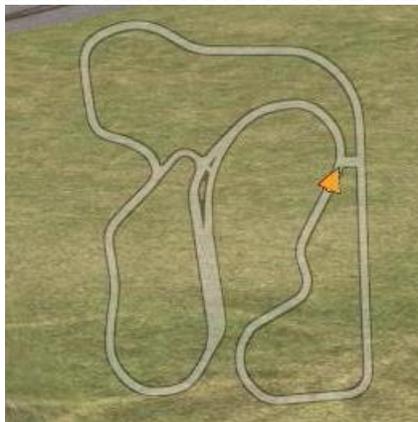
Por fim, para avaliar a eficiência dos diferentes modelos com diferentes valores de coeficientes aerodinâmicos na questão de consumo de energia, neste caso bateria, foi modelado um teste a partir da pista de *handling course* com 2274 metros de comprimento, uma das pistas do campo de provas virtual fornecido pelo CarSim.

Os veículos percorreram e deram a quantidade de voltas possíveis dentro de 1:30 hora e foram monitorados os valores de porcentagem de bateria remanescente e distância percorrida.

Os carros tentam percorrer a pista a uma velocidade constante de 50 e 60 km/h, sofrendo pequenas alterações conforme o desempenho alcançado. Todos os veículos iniciam com 80% da bateria carregada.

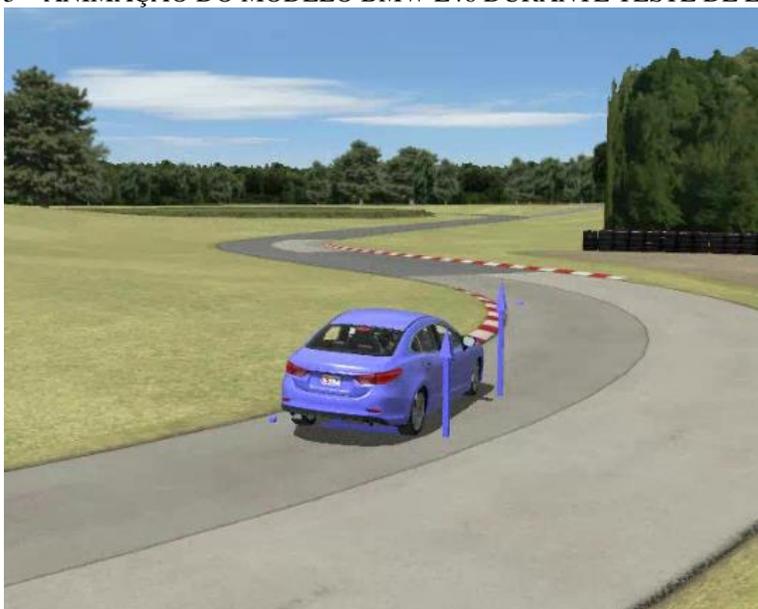
Na sequência, é mostrada uma vista superior da trajetória da pista de *handling course* e uma vista do modelo BMW E46 em teste.

FIGURA 4.34 – VISTA SUPERIOR DA PISTA DE HANDLING COURSE



FONTE: CarSim (2022)

FIGURA 4.35 – ANIMAÇÃO DO MODELO BMW E46 DURANTE TESTE DE ENDURANCE



FONTE: O autor (2022)

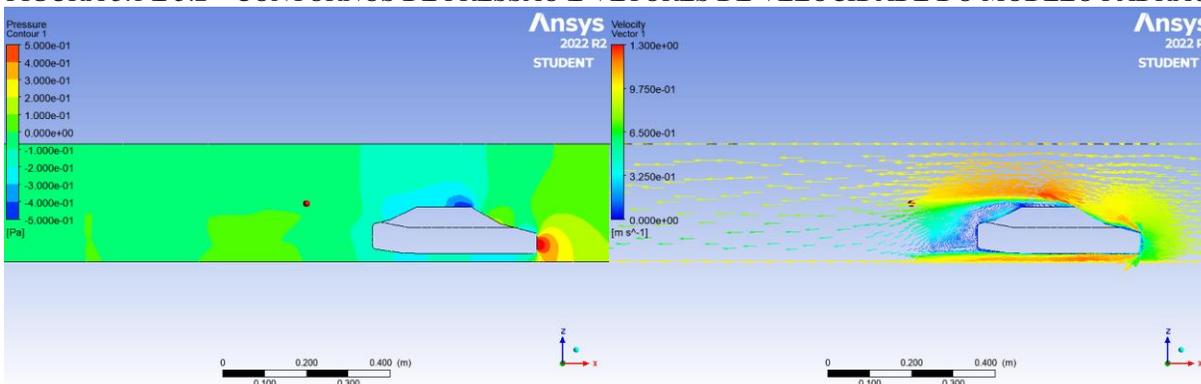
## 5 RESULTADOS

Após a apresentação de toda a referência teórica necessária para o entendimento do estudo e metodologia em cada etapa utilizada, é apresentado nessa seção os resultados obtidos. São apresentados a visualização do escoamento ao redor dos veículos, gráficos comparativos dos modelos de cada coeficiente em função do ângulo de derrapagem e tabelas comparativas de desempenho nos diferentes testes dinâmicos propostos. Por fim, é calculada uma matriz de correlação entre os parâmetros aerodinâmicos e os resultados dos testes.

### 5.1 Visualização do escoamento em CFD

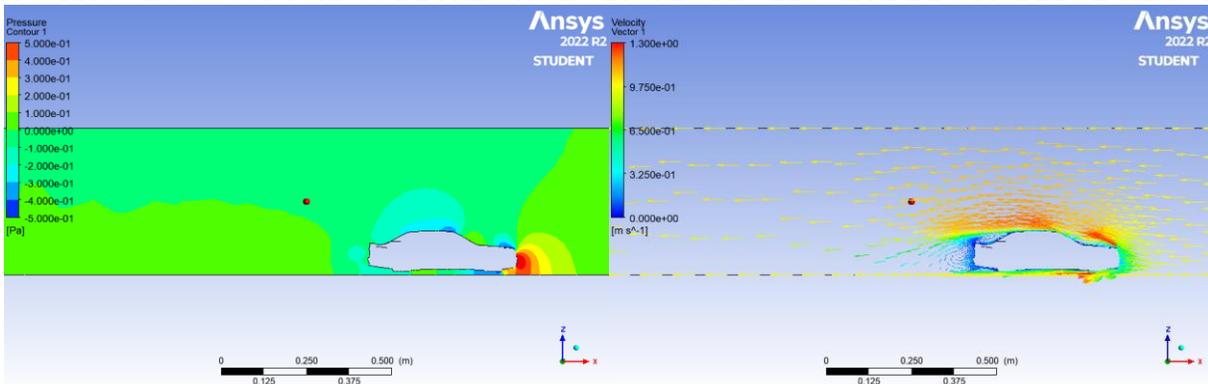
Os primeiros resultados obtidos após a análise numérica são as visualizações dos contornos de pressão e vetores de velocidade no domínio fluido. De forma a não ficar extensa a apresentação de todos os modelos em todas as condições de angulação de fluxo de entrada, são colocados abaixo apenas imagens dos resultados no eixo de simetria do modelo na condição com ângulo de incidência do fluxo nulo. Para melhor comparação entre os resultados, foi padronizado o intervalo de legenda entre -0.5 Pa e 0.5 Pa nos contornos de pressão e de 0 a 1,3 m/s em magnitude os vetores de velocidade.

FIGURA 5.1 E 5.2 – CONTORNOS DE PRESSÃO E VETORES DE VELOCIDADE DO MODELO PADRÃO



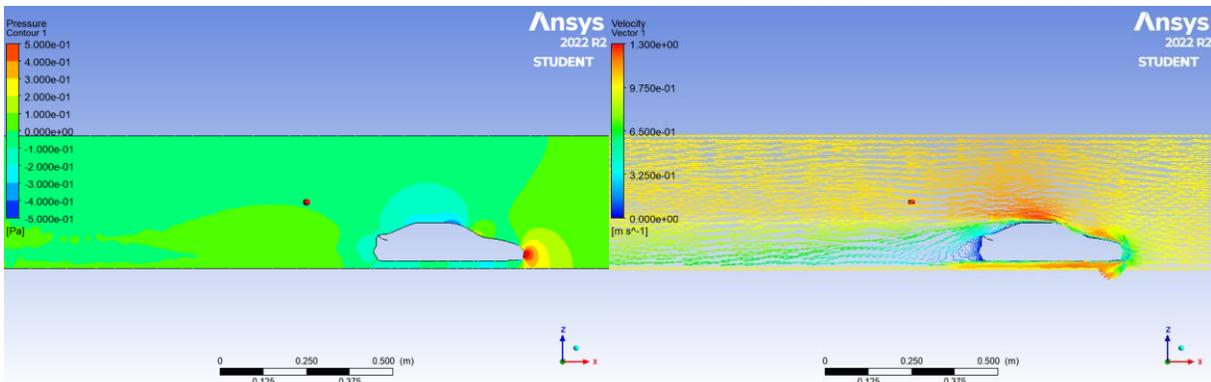
FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.3 E 5.4 – CONTORNOS DE PRESSÃO E VETORES DE VELOCIDADE DO MODELO E-KLASSE



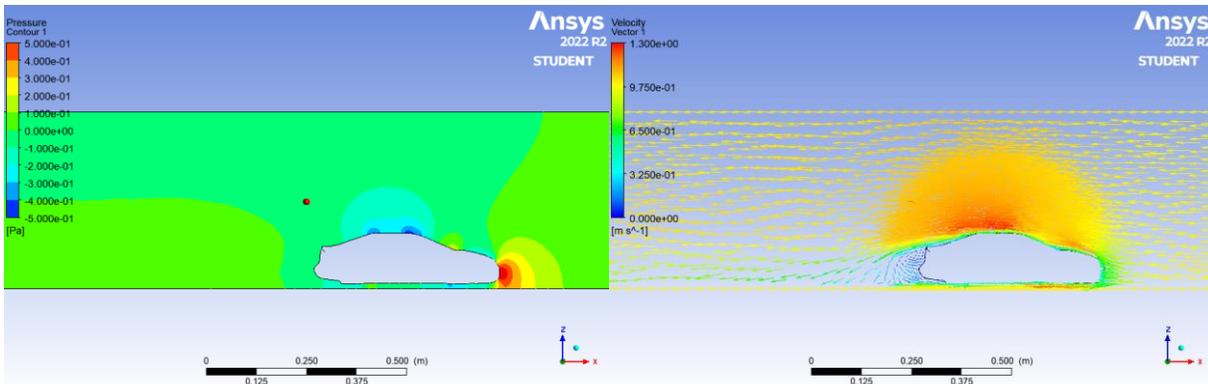
FONTES: O autor (2022)

FIGURA 5.5 E 5.6 – CONTORNOS DE PRESSÃO E VETORES DE VELOCIDADE DO MODELO CIVIC



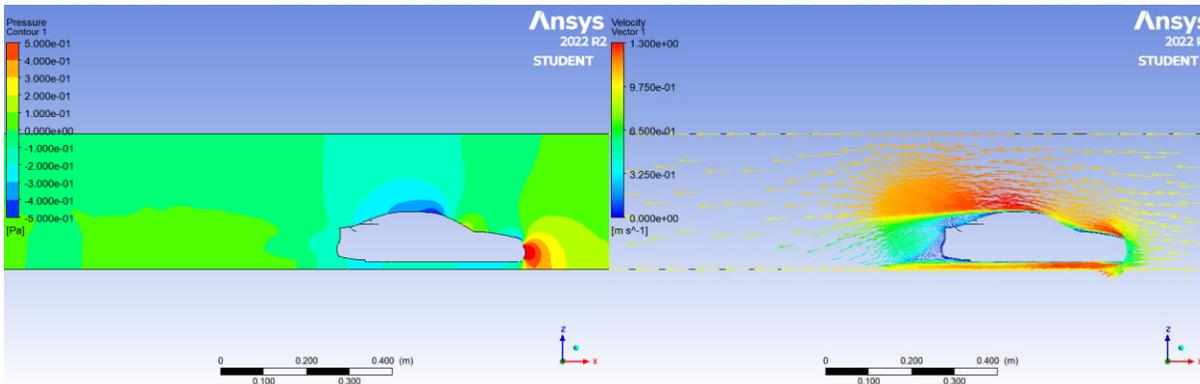
FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.7 E 5.8 – CONTORNOS DE PRESSÃO E VETORES DE VELOCIDADE DO MODELO CRUZE RS



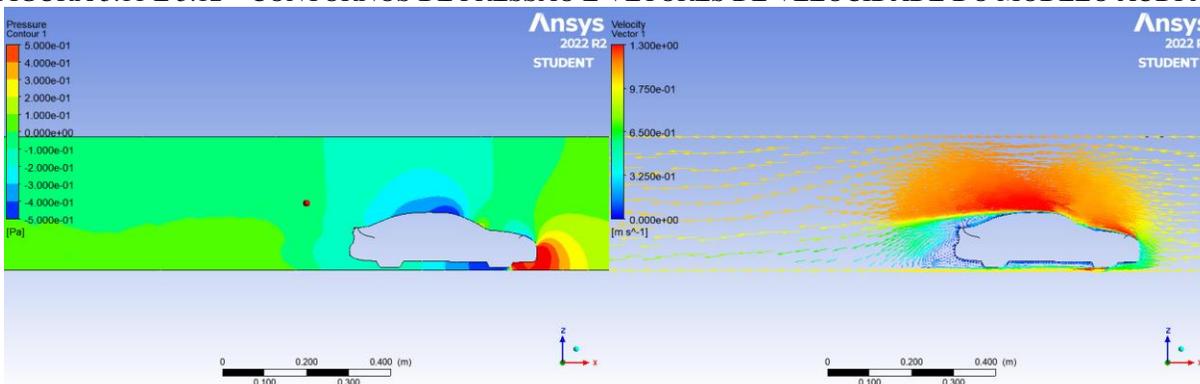
FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.9 E 5.10 – CONTORNOS DE PRESSÃO E VETORES DE VELOCIDADE DO MODELO BMW E46



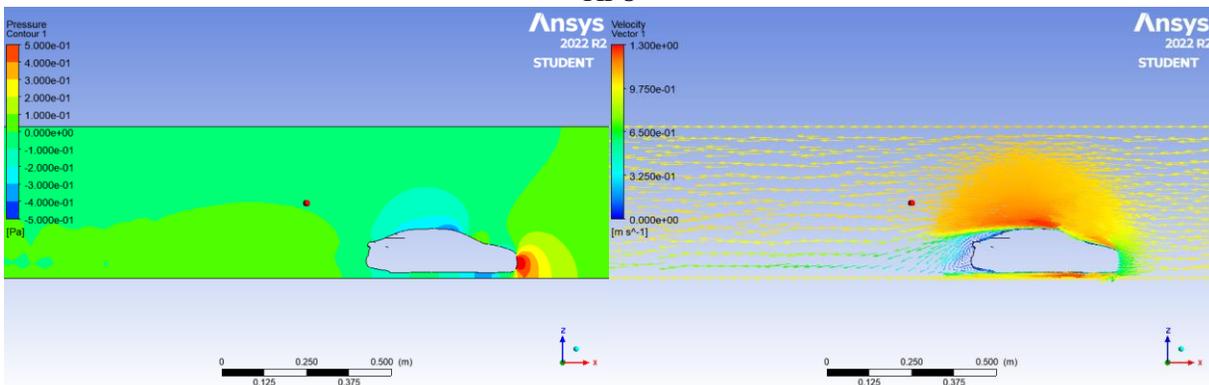
FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.11 E 5.12 – CONTORNOS DE PRESSÃO E VETORES DE VELOCIDADE DO MODELO AUDI A3



FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.13 E 5.14 – CONTORNOS DE PRESSÃO E VETORES DE VELOCIDADE DO MODELO FIAT TIPO



FONTE: O autor (2022)

Através desses resultados, podemos ver claramente, para que os modelos mais atuais, Chevrolet Cruze, BMW E46, Audi A3 e Fiat Tipo, que as mudanças na traseira do veículo, deixando-a um pouco mais alta e formato curvilíneo na forma de difusor na parte inferior,

impactaram positivamente na redução de vórtices posteriormente ao veículo, reduzindo dessa forma a recirculação responsável pela turbulência e, conseqüentemente, arrasto.

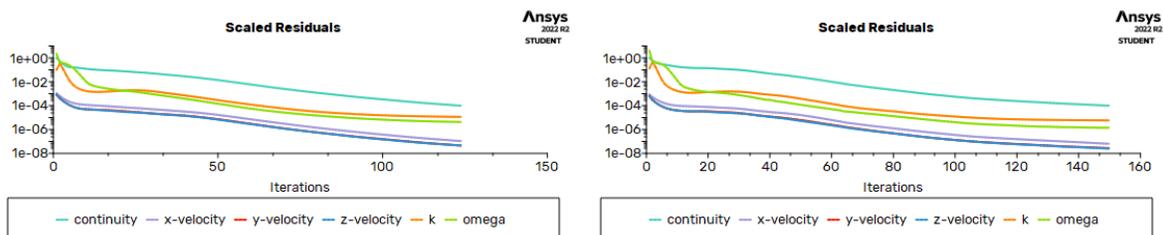
Além disso, é possível ver os detalhes das curvas em formatos parecidos com aerofólios na parte superior dos modelos entre o parabrisa e a traseira. Os vetores de velocidade mostram que essas modificações permitiram que a camada limite do escoamento ficasse mais aderente a superfície do veículo, mesmo em uma distância percorrida maior.

O modelo padrão, por ter dobras mais bruscas em seu modelo, visualmente apresentou um deslocamento da camada limite na região superior do veículo com antecedência e grandes vórtices turbulentos após veículo.

Nota-se também, para todos estes modelos, regiões com pressões maiores na parte inferior do veículo do que nas regiões acima, resultando em uma sustentação positiva, o que se espera impactar negativamente no desempenho dos modelos.

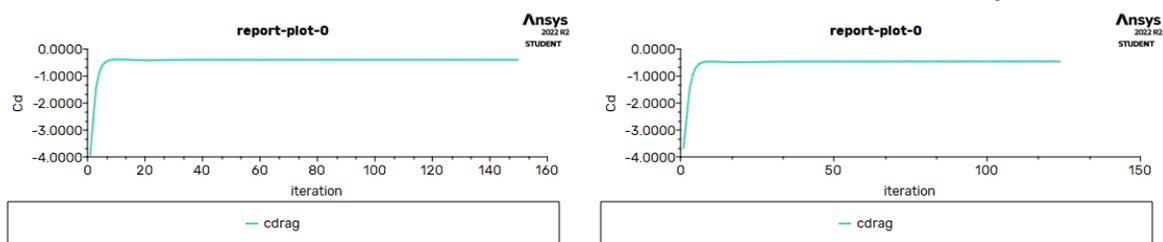
Ao longo desse processo de solução das equações da simulação, foram monitorados os resíduos numéricos de cada iteração até se atingir a convergência definida, apresentados na Figuras 5.15 e 5.16 a seguir, com os resultados do Honda Civic (à esquerda) e do Fiat Tipo (à direita) utilizados como exemplares. Analisou-se também a convergência da física do modelo através do monitoramento dos coeficientes aerodinâmicos. Observa-se que os modelos atingiram o patamar de convergência antes mesmo do limite de iterações aplicados.

FIGURA 5.15 E 5.16 – CONVERGÊNCIA DOS RESÍDUOS DAS SIMULAÇÕES



FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.17 E 5.18 – CONVERGÊNCIA DOS COEFICIENTES DAS SIMULAÇÕES



FONTE: O autor (2022)

## 5.2 Comparativo de parâmetros aerodinâmicos

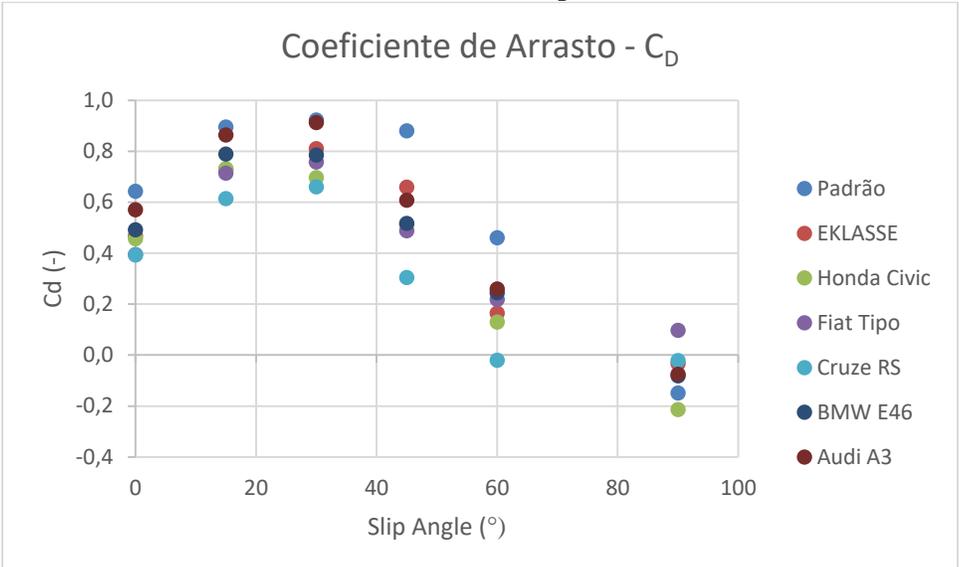
Apesar da visualização do escoamento e identificação de contornos de pressão e velocidade trazerem bons pontos de análise dos modelos, a determinação dos coeficientes aerodinâmicos é essencial para quantificar a melhoria do design através das análises de desempenho. Por isso, como meio de facilitar a comparação entre os modelos em cada coeficiente avaliado, foram criados gráficos sobrepondo os dados de resultados de cada modelo em função do *slip angle*, conforme imagens abaixo. Como informação complementar, é apresentado na Tabela 3 abaixo as áreas frontais dos modelos em escala real.

TABELA 3 – ÁREAS FRONTAIS PROJETADAS DOS VEÍCULOS

Modelo de veículo	Área Frontal (m <sup>2</sup> )
Padrão	2,176
Mercedes E Klasse	2,070
Honda Civic	1,843
Fiat Tipo	2,451
Chevrolet Cruze RS	2,341
BMW E46	2,010
Audi A3	2,314

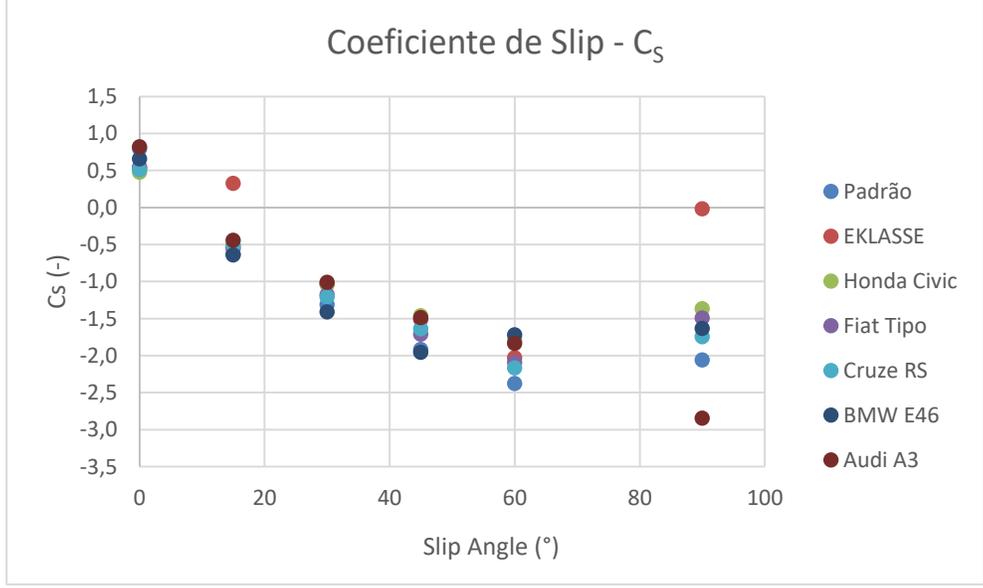
FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.19 – COMPARATIVO DE  $C_D$  ENTRE OS MODELOS



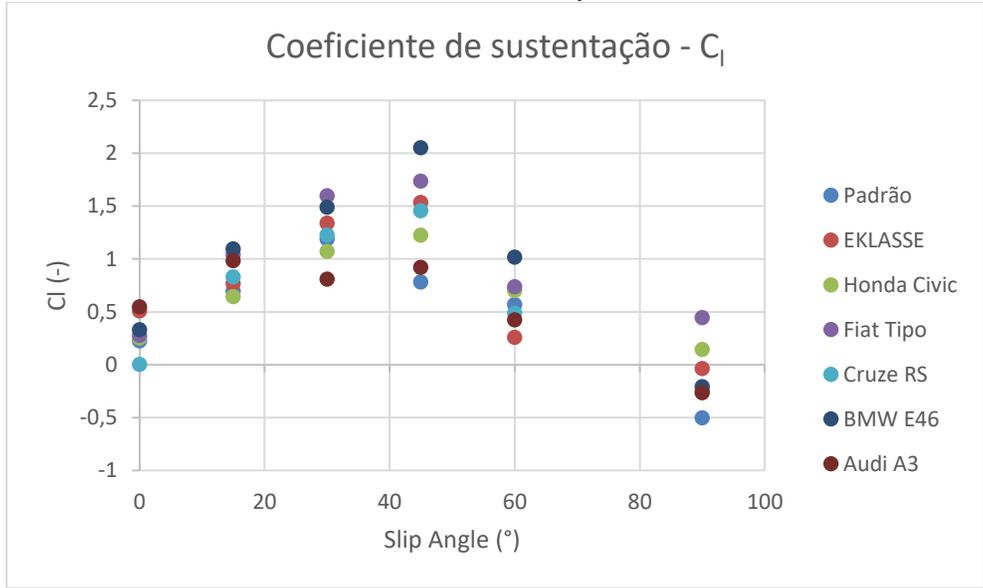
FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.20 – COMPARATIVO DE  $C_S$  ENTRE OS MODELOS



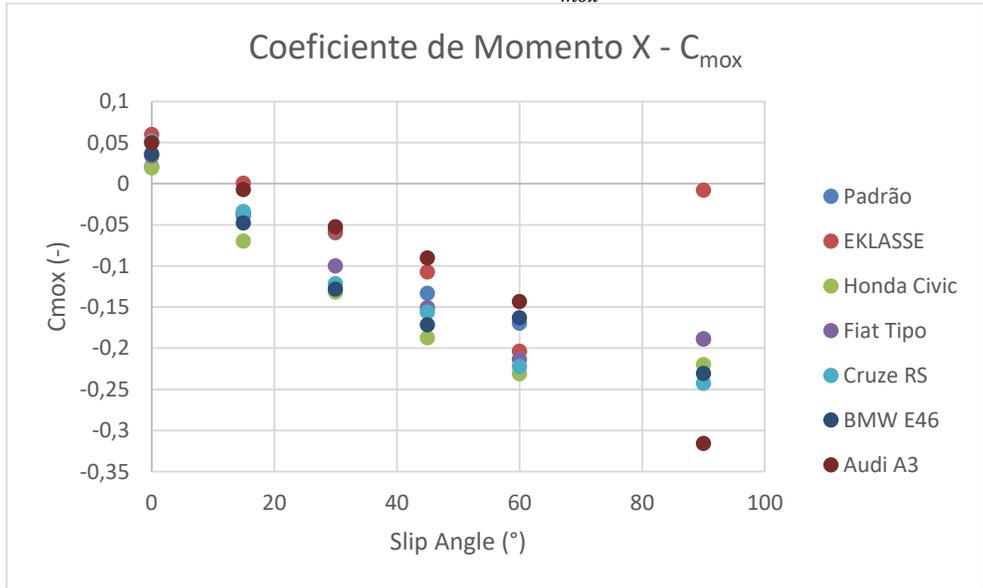
FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.21 – COMPARATIVO DE  $C_l$  ENTRE OS MODELOS

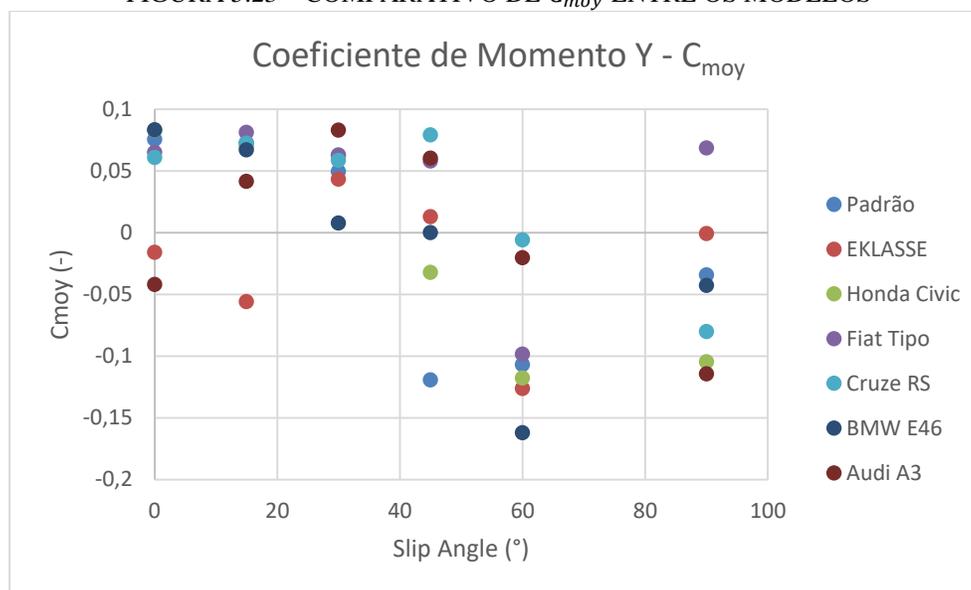


FONTE: O autor (2022)

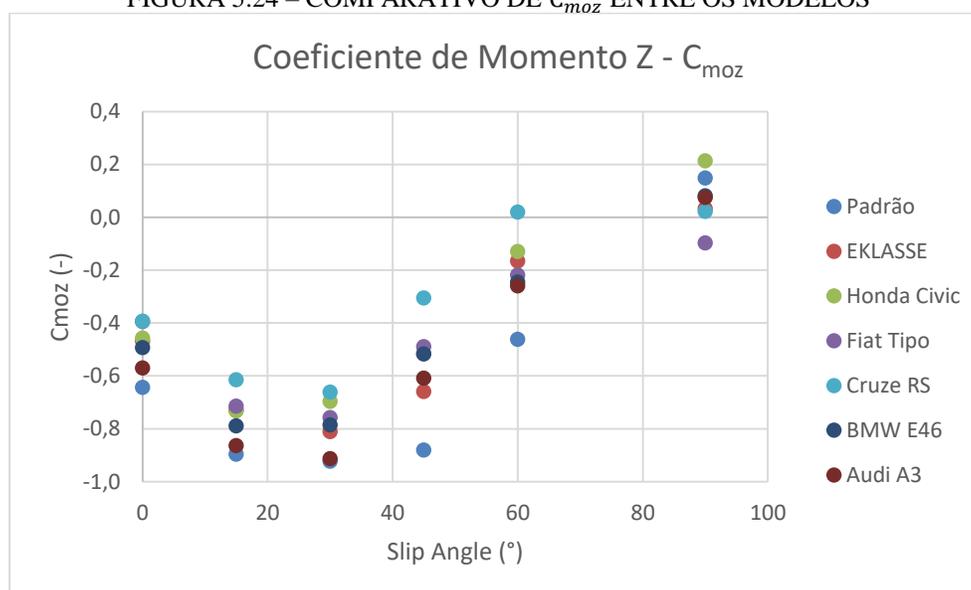
FIGURA 5.22 – COMPARATIVO DE  $C_{mox}$  ENTRE OS MODELOS



FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.23 – COMPARATIVO DE  $C_{moy}$  ENTRE OS MODELOS

FONTE: O autor (2022)

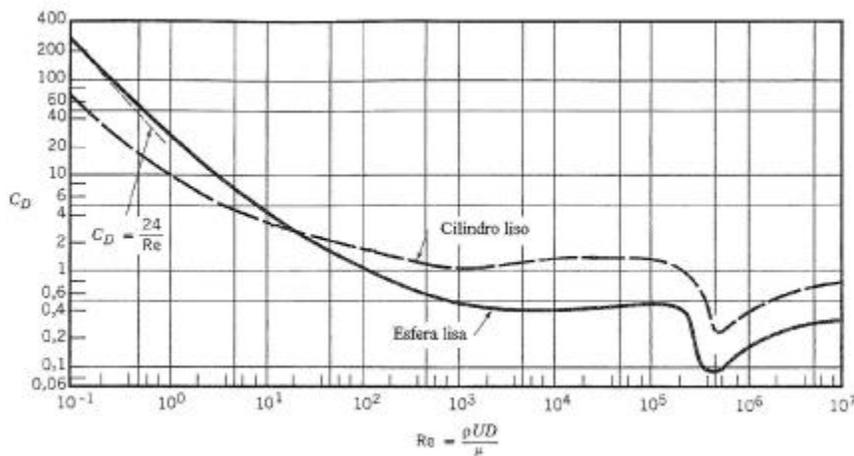
FIGURA 5.24 – COMPARATIVO DE  $C_{moz}$  ENTRE OS MODELOS

FONTE: O autor (2022)

Primeiramente, é importante ressaltar que devido á baixa velocidade imposta na simulação, o número de Reynolds ficou em ordens de grandeza inferior à sua aplicação real, em torno de  $2,5 * 10^4$  comparado à  $6 * 10^6$ , valor padrão na literatura. Consequentemente, conforme apresentado na Figuras 5.19 e 5.21, os coeficientes têm seus valores elevados pois há maiores efeitos viscosos

no escoamento. Como comparativo, o modelo Padrão teve seu  $C_D$  calculado no valor de 0,23 para altos números de Reynolds (Discentes da disciplina FEMEC43907), valor 62% menor que o calculado nesse trabalho. Entretanto, deve-se ter como referência que o objetivo deste estudo é avaliar comparativamente os modelos, e as variações não sofrem impacto devido a esse fenômeno.

FIGURA 5.25 – VALORES TÍPICOS DE  $C_D$  EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS



FONTE: Prof. Antonio Luiz Pacífico (2017)

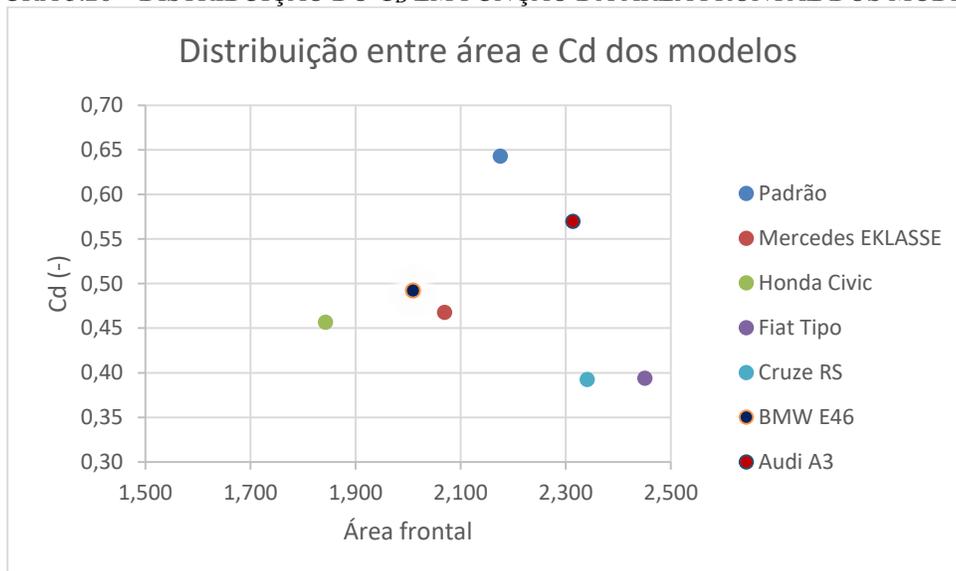
Apesar de difícil análise e decisão sobre qual o melhor modelo a partir apenas desses resultados, visto que, para cada situação, um desses parâmetros é mais determinante, tem-se como verdades, na grande maioria dos casos, que um coeficiente de arrasto maior reduz o desempenho do veículo e conforme esperado, vistos os contornos de pressão, pode-se observar na Figura 5.19 que os veículos mais atuais como o BMW E46, Fiat Tipo e Chevrolet Cruze RS apresentam melhores valores nas diferentes condições de *slip angle*.

Outro fator importante é o coeficiente de sustentação, em que um valor menor, ou até negativo, representa uma aderência melhor do veículo com o solo. Novamente os modelos Cruze RS e Tipo apresentaram os melhores valores. Deve-se ter um destaque também para o Honda Civic que, mesmo sendo um modelo mais antigo, por ter um design mais esportivo, também apresentou uma boa relação de  $C_L$  e  $C_D$ .

Importante ressaltar que, em vista da simetria dos modelos em CAD, os valores correspondentes de  $C_S$  para a condição de *slip angle* nulo devem ser considerados como erros numéricos e foram desconsiderados na aplicação das curvas aerodinâmicas nos modelos do CarSim.

Por fim, à título de informação que auxilia no compreendimentos e interpretação dos resultados dos testes dinâmicos a seguir, é apresentado em formato de gráfico a distribuição dos valores de coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) e a área de referência dos modelos, que são as áreas frontais.

FIGURA 5.26 – DISTRIBUIÇÃO DO  $C_D$  EM FUNÇÃO DA ÁREA FRONTAL DOS MODELOS



FONTE: O autor (2022)

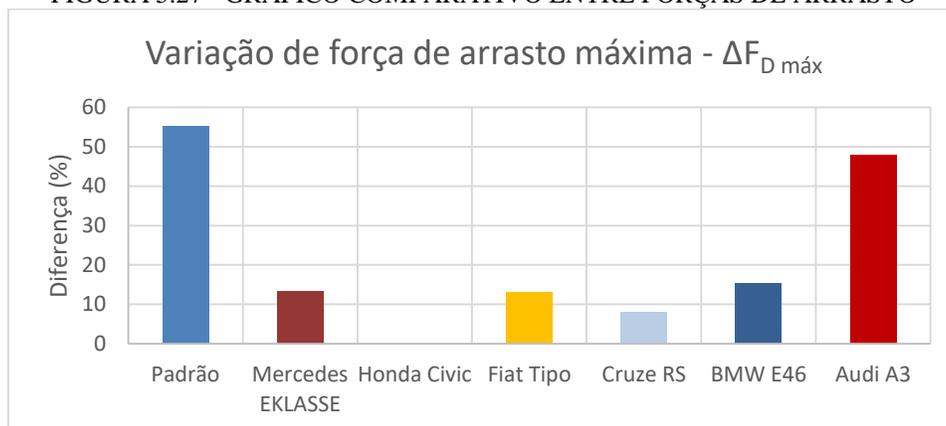
### 5.3 CarSim

A partir dos coeficientes obtidos e implementados no Carsim, assim como a modelagem dos procedimentos e teste a serem realizados, enfim pode-se obter resultados comparativos de desempenho entre os veículos.

#### 5.3.1 Top Speed test

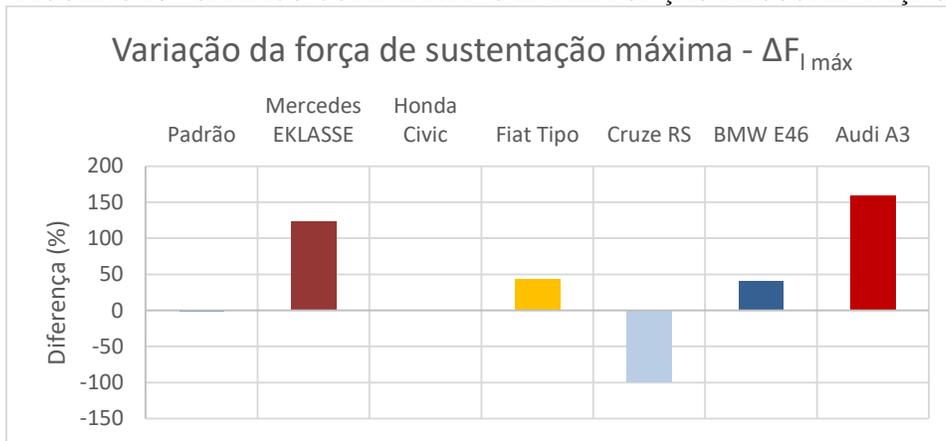
A seguir são apresentados os gráficos comparativos dos principais parâmetros aerodinâmicos a serem avaliados no teste de velocidade máxima: a força de arrasto, de sustentação e velocidade máxima.

FIGURA 5.27 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE FORÇAS DE ARRASTO



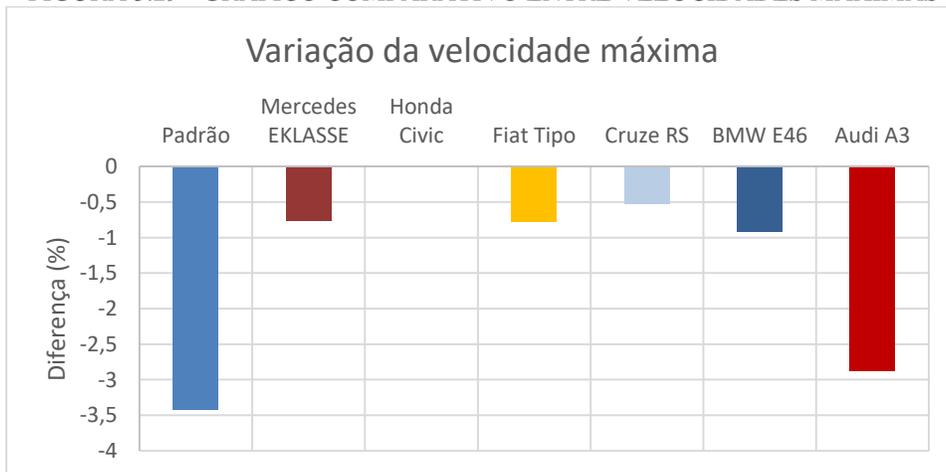
FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.28 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE FORÇAS DE SUSTENTAÇÃO



FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.29 - GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE VELOCIDADES MÁXIMAS



FONTE: O autor (2022)

Conforme esperado, modelos com maiores coeficientes de arrasto apresentaram velocidades máximas menores. Entretanto, é importante ressaltar que a força de arrasto também é função da velocidade atingida em cada carro, logo comparar diretamente a força de arrasto com a velocidade pode gerar conclusões imprecisas, ou seja, a análise deve ser baseada nos coeficientes adimensionais e área frontal.

### 5.3.2 Brake test

Para o teste de frenagem, foram mensurados a distância total desde início da aplicação dos freios até a paralisação total do veículo, denominado no CarSim como *station*. Além disso, como base de análise, foram listadas as forças de arrasto e de sustentação no início da frenagem.

Devido aos valores de referência terem sido obtidos do modelo Cruze RS, que teve melhor desempenho (menor distância de frenagem), os valores correspondentes à variação de força vertical ficaram extremamente altos, pois este veículo apresentou baixo  $C_l$ . Portanto, optou-se por apresentar os resultados em forma de tabela.

TABELA 4 – COMPARATIVO DE DESEMPENHO DO TESTE DE FRENAGEM

<b>Braking - 120 km/h</b>			
Modelo	$\Delta station$ (%)	$\Delta f_{xmax}$ (%)	$\Delta f_{zmax}$ (%)
Padrão	0,621	52,265	7255,457
Mercedes EKLASSE	2,076	5,274	15783,691
Honda Civic	1,215	-8,442	6879,692
Fiat Tipo	1,226	5,078	10100,603
Cruze RS	0,000	0,000	0,000
BMW E46	1,133	7,580	9886,942
Audi A3	1,726	43,454	19048,505

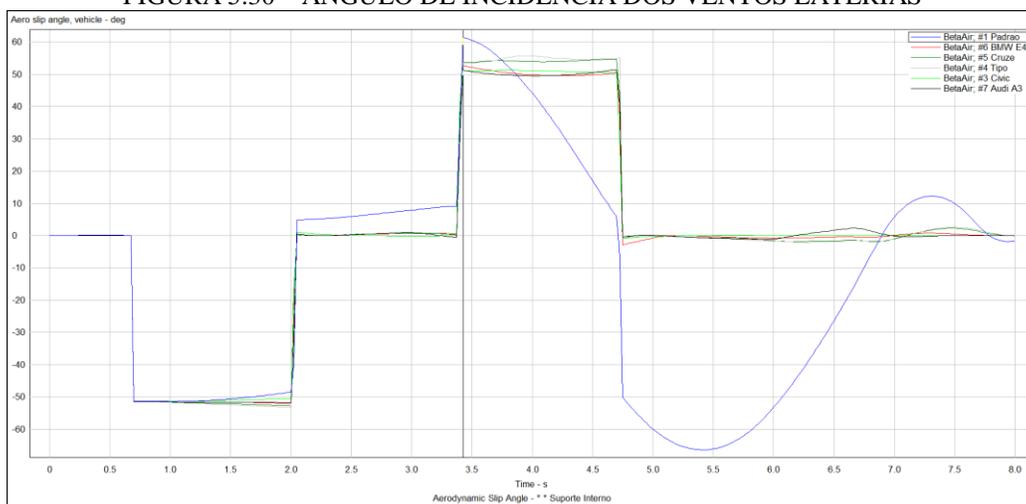
FONTE: O autor (2022)

Com esses resultados, nota-se que mesmo a força de arrasto ser importante fator para frear o veículo, conhecido como freio aerodinâmico, ter um baixo coeficiente de sustentação impactou em maior intensidade e de forma positiva na frenagem.

### 5.3.3 Crosswind test

Primeiramente, é analisado o ângulo de incidência resultante do vento quando atinge o veículo. A Figura 5.30 apresenta esses ângulos.

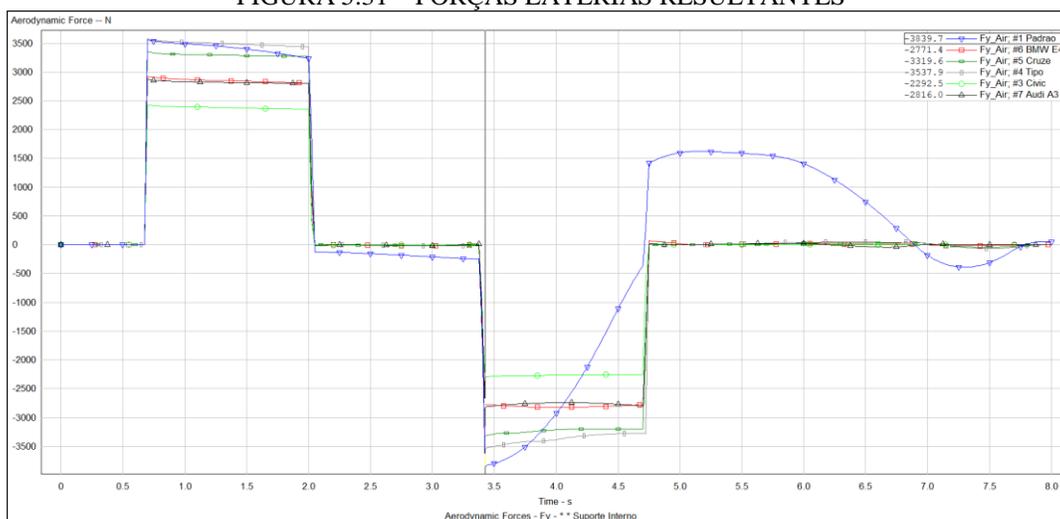
FIGURA 5.30 – ÂNGULO DE INCIDENCIA DOS VENTOS LATERIAS



FONTE: O autor (2022)

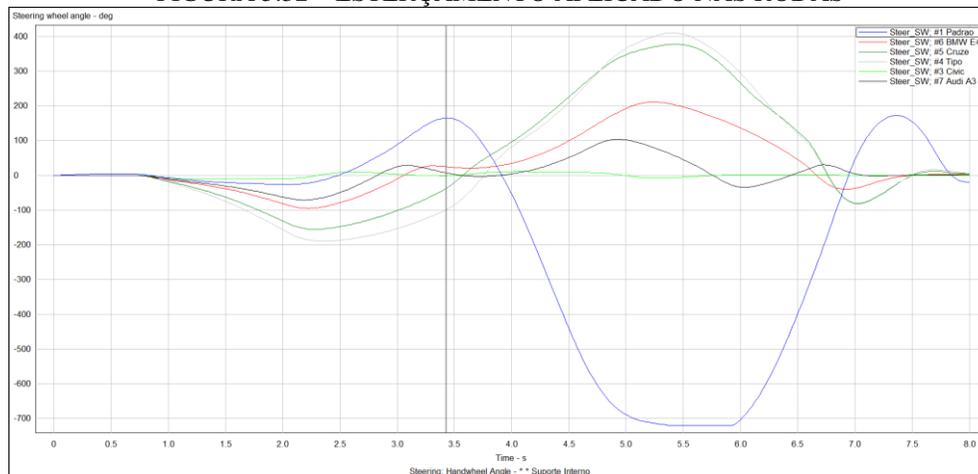
Na sequência, foram obtidos os resultados de forças laterais resultantes no tempo durante a simulação e o esterçamento aplicado nas rodas para manter o veículo em linha reta.

FIGURA 5.31 – FORÇAS LATERIAS RESULTANTES



FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.32 – ESTERÇAMENTO APLICADO NAS RODAS



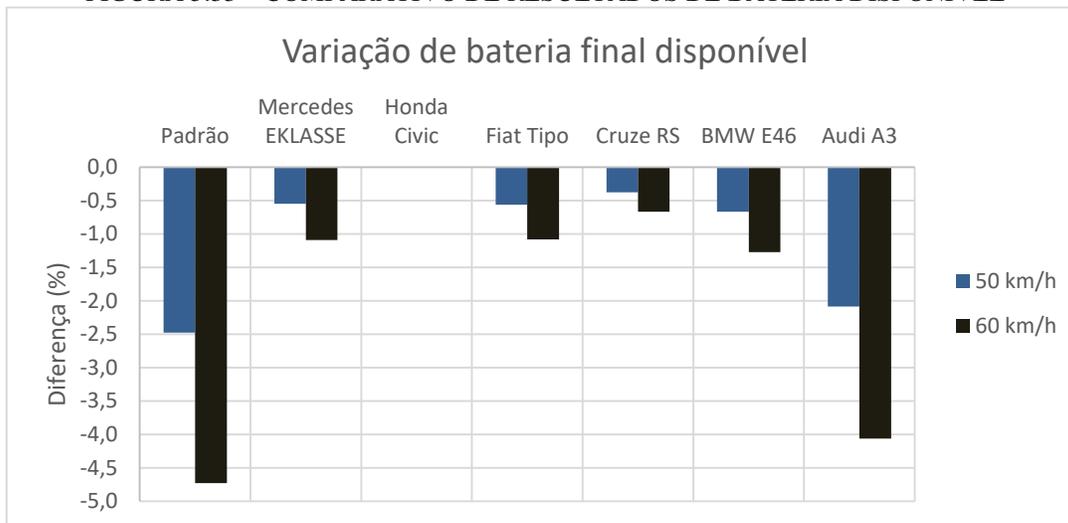
FONTE: O autor (2022)

Nota-se que devido aos dados obtidos em CFD do modelo padrão, este apresentou comportamento bem agressivo devido às altas cargas geradas. Conclui-se que veículos com maiores coeficientes de força lateral e comprimento sofreram maiores cargas ao longo da trajetória.

#### 5.3.4 Endurance

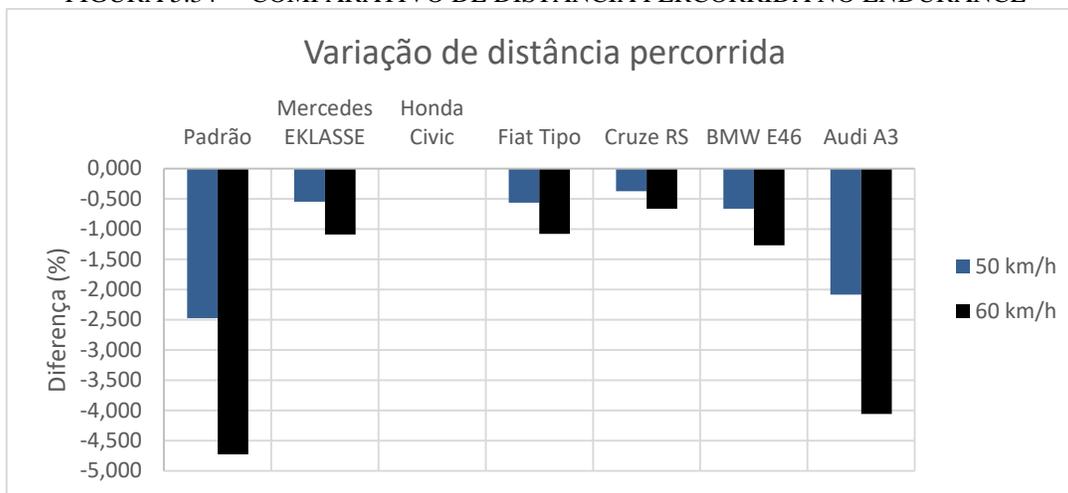
A etapa de endurance apresenta os principais resultados para esse estudo, visto que, não só permite a análise dos coeficientes aerodinâmicos em diferentes *slip angles* em testes de pista, como também avaliar o consumo energético e a capacidade de atingir velocidades maiores. Abaixo, são mostradas gráficos comparativos dos testes realizados com a velocidade alvo constante de 50 km/h e 60 km/, respectivamente.

FIGURA 5.33 – COMPARATIVO DE RESULTADOS DE BATERIA DISPONÍVEL



FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.34 – COMPARATIVO DE DISTÂNCIA PERCORRIDA NO ENDURANCE



FONTE: O autor (2022)

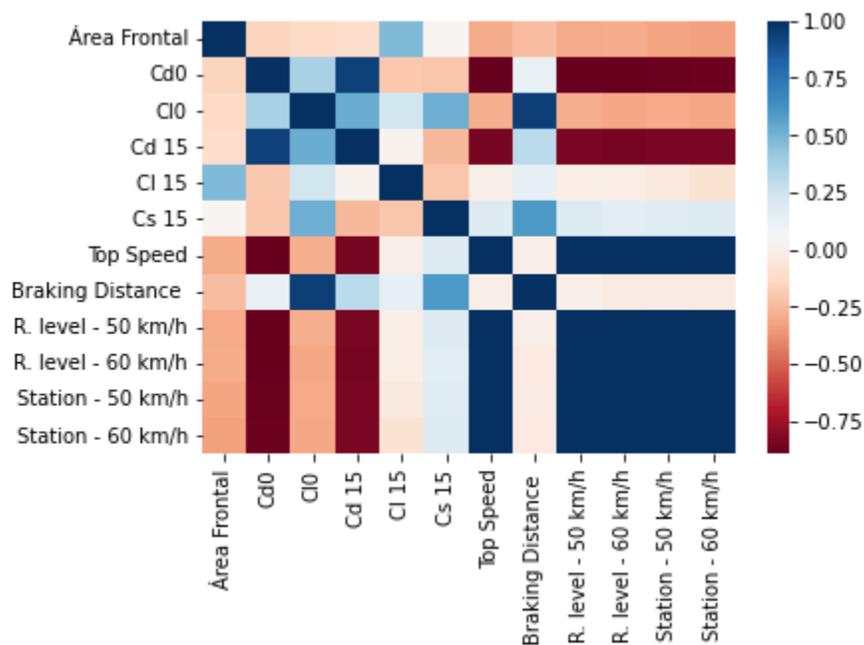
Inicialmente, comparando o comportamento geral entre os dois testes, nota-se que apesar de ser um incremento de apenas 10 km/h, a diferença entre o veículo de melhor desempenho com os demais se tornou cerca de 80% maior, implicando que quanto maior a velocidade, maior o impacto da aerodinâmica no desempenho.

## 5.4 Correlação entre parâmetros

A partir de todos os resultados de *inputs* e *outputs* do CarSim, foi possível criar uma matriz de correlação entre os parâmetros de forma a avaliar a magnitude em cada resultado. Importante ressaltar que correlação não necessariamente implica em causalidade. Por exemplo, Cs nos testes de frenagem tem seu impacto praticamente nulo no desempenho do veículo, entretanto de acordo com a matriz, apresentam uma correlação positiva inexistente.

A matriz define a correlação em uma escala de -1 a 1, sendo o valor negativo implicando que o aumento de um determinado parâmetro, resulta na diminuição do outro, e vice-versa. Abaixo são mostrados os resultados.

FIGURA 5.35 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS



FONTE: O autor (2022)

FIGURA 5.36 – VALORES DE CORRELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS AERODINÂMICOS E RESULTADOS DOS TESTES

	Área Frontal	Cd0	Cl0	Cd 15	Cl 15	Cs 15	Top Speed	Braking Distance	R. level - 50 km/h	R. level - 60 km/h	Station - 50 km/h	Station - 60 km/h
Área Frontal	1.000000	-0.157680	-0.137830	-0.120310	0.469302	0.034793	-0.301841	-0.238591	-0.303191	-0.299294	-0.318777	-0.336376
Cd0	-0.157680	1.000000	0.363097	0.940285	-0.205559	-0.207890	-0.893570	0.124955	-0.892915	-0.894391	-0.884936	-0.874468
Cl0	-0.137830	0.363097	1.000000	0.525764	0.233020	0.515529	-0.290723	0.945612	-0.290383	-0.310083	-0.303975	-0.316230
Cd 15	-0.120310	0.940285	0.525764	1.000000	0.020637	-0.255813	-0.850204	0.309256	-0.849908	-0.855116	-0.846651	-0.844788
Cl 15	0.469302	-0.205559	0.233020	0.020637	1.000000	-0.211417	-0.013097	0.139733	-0.014272	-0.017753	-0.042823	-0.081088
Cs 15	0.034793	-0.207890	0.515529	-0.255813	-0.211417	1.000000	0.174560	0.598037	0.175036	0.161021	0.167167	0.171353
Top Speed	-0.301841	-0.893570	-0.290723	-0.850204	-0.013097	0.174560	1.000000	-0.012664	0.999997	0.999773	0.999429	0.996649
Braking Distance	-0.238591	0.124955	0.945612	0.309256	0.139733	0.598037	-0.012664	1.000000	-0.012200	-0.032670	-0.023227	-0.035626
R. level - 50 km/h	-0.303191	-0.892915	-0.290383	-0.849908	-0.014272	0.175036	0.999997	-0.012200	1.000000	0.999775	0.999447	0.996651
R. level - 60 km/h	-0.299294	-0.894391	-0.310083	-0.855116	-0.017753	0.161021	0.999773	-0.032670	0.999775	1.000000	0.999465	0.996771
Station - 50 km/h	-0.318777	-0.884936	-0.303975	-0.846651	-0.042823	0.167167	0.999429	-0.023227	0.999447	0.999465	1.000000	0.998585
Station - 60 km/h	-0.336376	-0.874468	-0.316230	-0.844788	-0.081088	0.171353	0.996649	-0.035626	0.996651	0.996771	0.998585	1.000000

FONTE: O autor (2022)

A partir dessas matrizes, nota-se que, como se era esperado, o coeficiente de arrasto  $C_{D0}$  tem maior influência na velocidade máxima atingida pelo veículo, visto que, mesmo que os altos valores de sustentação diminuam o poder de aceleração do veículo, o tempo até atingir esse pico de velocidade não foi avaliado.

Para o teste de distância de frenagem, surpreende-se a alta relação entre um coeficiente de sustentação alto e a maior distância de frenagem necessária.

Quanto ao teste de *endurance*, nota-se que quanto maior a velocidade, maior o impacto negativo do  $C_l$  tanto em relação à distância em que o veículo conseguiu percorrer quanto ao consumo de combustível. Para o coeficiente de arrasto, essa lógica não se manteve, o que pode ser resultado da característica da pista.

Nota-se por fim que a área frontal, de acordo com os modelos utilizados nesse estudo, apresentou menor impacto quando comparado ao coeficiente de arrasto e ao coeficiente de sustentação em alguns casos, logo se conclui que a otimização desses coeficientes é mais relevante que buscar reduzir a área frontal, que muitas vezes resulta em menor espaço de cabine e conforto dos passageiros.

## 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar e quantificar o relacionamento entre os principais parâmetros aerodinâmicos com a avaliação em diferentes testes de desempenho automotivos, incluindo o teste de eficiência energética em relação ao consumo de bateria. As entradas dessas análises foram obtidas através da escolha e modelagem em CAD de diferentes modelos de veículos automotores que então foram submetidos a uma análise de volumes finitos onde foram obtidos os respectivos valores dos coeficientes  $C_D$ ,  $C_S$ ,  $C_l$ ,  $C_{\text{max}}$ ,  $C_{\text{moy}}$  e  $C_{\text{moz}}$  para diferentes ângulos de derrapagem.

É necessário ressaltar que as modelagens em CAD dos exemplares de mercado foram simplificadas e, devido aos limites de malha impostos ao se utilizar a versão estudantil do Ansys, os valores de coeficientes aerodinâmicos calculados podem não estar de acordo com os valores reais desses veículos.

As análises dinâmicas com os veículos representativos demonstraram que o coeficiente de arrasto, conforme esperado, tinha grande correlação negativa com a eficiência no consumo de bateria, assim como um coeficiente de sustentação positivamente alto, resultou em uma alta correlação com maiores distancias de frenagem, já que diminui o contato dos pneus com o solo.

Desta forma, pode-se concluir que os objetivos iniciais foram cumpridos. Foi possível visualizar de forma prática as teorias de aerodinâmica automotiva associadas à dinâmica veicular. A utilização de diferentes modelos de veículos e a obtenção dos coeficientes aerodinâmicos permitiram não só visualizar as diferenças que a aerodinâmica causa no desempenho dos carros como gerar, a partir de uma pequena amostra estatística, uma matriz de correlação de forma a quantificar suas influências.

### 6.1 Sugestão para trabalhos futuros

Como sugestões para possíveis trabalhos futuros, para prosseguimento e avanço no estudo sobre os efeitos aerodinâmicos no desempenho e consumo de bateria, tem-se a obtenção de valores dos coeficientes em maiores números de Reynolds, para resultar em coeficientes aerodinâmicos mais representativos para a condição de velocidade de operação dos veículos. Outro ponto de

destaque é, se possível, a utilização de maior quantidade de elementos de malha, de forma a tornar possível maior refinamento em regiões de recirculação do fluxo e com grandes gradientes de propriedades.

Recomenda-se também aumentar o conjunto de dados de base para alimentar a matriz de correlação e obter resultados mais fidedignos, seja através de outros modelos analisados via CFD ou gerar uma base aleatória de teste. Pode-se também abdicar de fazer análises em CFD para altos *slip angles*, acima de  $60^\circ$ , caso o interesse for apenas no consumo de bateria, visto que em uma pista de endurance, o veículo está sujeito a apenas baixos valores de *slip angle*.

Por fim, recomenda-se realizar o teste de endurance em diferentes pistas e com maior variação de velocidades dos veículos ao longo do circuito, podendo agregar a uma mesma análise desempenho em curvas, de aceleração e frenagem, com o consumo de bateria.

## REFERÊNCIAS

AFIANTO, D.; HAN, Y.; YAN, P.; YANG, Y.; ELBARGHTHI, A.F.A.; WEN, C. Optimisation and Efficiency Improvement of Electric Vehicles Using Computational Fluid Dynamics Modelling. *Entropy* 2022, 24, 1584. <https://doi.org/10.3390/e24111584>

ANDERSON, J. Fundamentals of aerodynamics, 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2001

ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. Ansys, 2013. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Users%20Guide.pdf>. Acessado em: 13 NOV 2022.

AKTAS,U.;ABDALLAH,K. Aerodynamics Concept Study of Electric Vehicles. Drag Reduction and Range Increase. Chalmers University of Technology, 2017.

AUTODATA. Venda de elétricos: 1,1 milhão de unidades em 2017. AutoData,2018. Disponível em: <https://www.autodata.com.br/curtas-algo-mais/2018/05/30/venda-de-eletricos-1-1-milhao-de-unidades-em-2017-/26904/>. Acessado em: 9 AGO 2022.

AVRAHAM, T. Know Thy Mesh – Mesh Quality – Part I. CFD Israel, 2019. Disponível em: <https://cfdisrael.blog/2019/02/01/know-thy-mesh-mesh-quality-part-i/#:~:text=The%20concept%20of%20mesh%20orthogonality,depending%20on%20the%20relevant%20topology>. Acessado em: 20 AGO 2022.

CARMO, B. Conceitos fundamentais em Mecânica dos Fluidos. USP, 2022. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4521305/mod\\_folder/content/0/Aula%2001/Slides-Aula\\_01-Conceitos\\_fundamentais-PME3238.pdf?forcedownload=1](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4521305/mod_folder/content/0/Aula%2001/Slides-Aula_01-Conceitos_fundamentais-PME3238.pdf?forcedownload=1). Acessado em: 12 AGO 2022

DAPENA, P.; SHERMAN, I. Electric cars have been around since before the US Civil War. CNN Business, 2019. Disponível em: <https://edition.cnn.com/interactive/2019/07/business/electric-car-timeline/index.html>. Acessado em: 10 AGO 2022.

F, Luiz. Avaliação da qualidade da malha. Notas em CFD, 2015. Disponível em: <http://notasemcfd.blogspot.com/2015/07/avaliacao-da-qualidade-da-malha.html>. Acessado em: 25 AGO 2022.

FORTUNA, A.O. Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos. v. 1, São Paulo: Editora da USP, 2000.

FREIRE, A. P. S. Teoria de Camada Limite. UFRJ, 1990. Disponível em:

[https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7857/1/CursoCamadaLimite\\_APSF2.pdf](https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7857/1/CursoCamadaLimite_APSF2.pdf). Acessado em: 11 AGO 2022.

KATZ, J. Race car aerodynamics: designing for speed 2. ed. Cambridge, MA, USA, 2006.

Disponível em:

<https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.fluid.38.050304.092016>. Acessado em: 18 AGO 2022.

KLEINA, N. A história dos carros elétricos. TecMundo,2021. Disponível em: <https://www.tecmundo.com.br/mobilidade-urbana-smart-cities/212835-historia-carros-eletricos-saiba-tudo-comecou.htm>. Acessado em 8 AGO 2022

LI, Y; ZHU, H. A Research on Electric Car Styling Design and Low Aerodynamic Drag. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019.

MCFADDEN, C. A Brief History and Evolution of Electric Cars. Interesting Engineering, 2020. Disponível em: <https://interestingengineering.com/transportation/a-brief-history-and-evolution-of-electric-cars>. Acessado em 8 AGO 2022

MENTER, F. Zonal Two Equation  $k-\omega$  Turbulence Models for Aerodynamic Flows", 1993. AIAA Paper 93-2906. Acessado em 19 AGO 2022.

RUMSEY, C. The Menter Shear Stress Transport Turbulence Model. TurbModels, 2021. Disponível em: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/sst.html>. Acessado em: 24 AGO 2022

SIMSCALE, Tutorial: Aerodynamics Simulation of Flow Around a Vehicle. Simscale, 2022. Disponível em: <https://www.simscale.com/docs/tutorials/aerodynamic-simulation-vehicle/>. Acessado em: 15 AGO 2022

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2ª Edição. Local de publicação: Pearson Education Limited, 2007.

XITADEL CAE TECHNOLOGIES INDIA PRIVATE LIMITED & AIRSHAPER. Impact of aerodynamic properties on CarSim & TruckSim simulations. 2020

WANG, L., KELLY, K., WALKOWICZ, K., and DURAN, A., "Quantitative Effects of Vehicle Parameters on Fuel Consumption for Heavy-Duty Vehicle," SAE Technical Paper 2015-01-2773, 2015, doi:10.4271/2015-01-2773.