

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO  
GRANDE DO SUL - CAMPUS ERECHIM  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**BRUNO VINÍCIUS DE CHRISTO**

**ESTUDO AERODINÂMICO DE UM PROTÓTIPO VEICULAR DE EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA POR MEIO DE SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS  
COMPUTACIONAIS**

**ERECHIM**

**2023**

BRUNO VINÍCIUS DE CHRISTO

**ESTUDO AERODINÂMICO DE UM PROTÓTIPO VEICULAR DE EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA POR MEIO DE SIMULAÇÕES FLUIDODINÂMICAS  
COMPUTACIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Erechim.

Orientador Prof. Dr. Airton Campanhola Bortoluzzi.

ERECHIM

2023

## RESUMO

Neste trabalho, foi desenvolvido um estudo aerodinâmico sobre a nova carenagem do protótipo de eficiência energética do Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Erechim, que participa das competições nacionais e internacionais da Shell Eco-marathon. Em tempos de elevadas demandas energéticas e aumento de níveis de poluição, o consumo de recursos finitos de forma cautelosa deve ser considerado. Em vista disso, a Shell Eco-marathon fomenta o desenvolvimento de novas tecnologias e projetos sustentáveis no âmbito da eficiência energética veicular. Nesse contexto, visando a otimização dos recursos disponíveis bem como da autonomia de consumo de gasolina em função da otimização aerodinâmica, o estudo se faz necessário durante a etapa de concepção do modelo, de forma a auxiliar as tomadas de decisões quanto à definição do formato e das dimensões do veículo. Para isso, fez-se uso de simulações computacionais fluidodinâmicas, realizadas por meio do software Ansys, com foco na obtenção dos coeficientes de arrasto ( $C_D$ ) e de sustentação ( $C_L$ ) do protótipo para as condições encontradas em pista durante as competições, com escoamentos de 25 e 40 km/h, além da visualização de características dos escoamentos. A metodologia empregada se baseou na definição de etapas e padrões para o processo, de modo a facilitar o fluxo das simulações e as análises dos resultados. Desenvolveu-se um estudo prévio do corpo de referência de Ahmed (25° inclinação traseira) com o objetivo de validação das simulações através da comparação de dados experimentais e simulados, em que se obteve uma diferença de 2,68% entre os coeficientes de arrasto; além disso, observou-se grande semelhança entre os comportamentos dos escoamentos. Desta forma, obteve-se experiência e informações valiosas para corretas configurações e desenvolvimentos das simulações. Quanto ao modelo Camelo II do protótipo, obteve-se valores de  $C_D$  e  $C_L$  equivalentes a 0,0784 e -0,226 no cenário de 25 km/h, respectivamente, representando um desempenho aerodinamicamente eficiente; o que é reforçado ao analisar a interação do fluido objeto, em que o ar apresenta boa aderência e relativa baixa deflexão.

**Palavras-chave: Aerodinâmica veicular; CFD; Eficiência energética; Protótipo SEM.**

## ABSTRACT

In this work, an aerodynamic study was developed on the new fairing of the energy efficiency prototype of the Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Campus Erechim, which participates in national and international Shell Eco-marathon competitions. In times of high energy demands and increasing pollution levels, the consumption of finite resources must be cautiously considered. Given this, the SEM encourages the development of new technologies and sustainable projects in vehicle energy efficiency. In this context, aiming to optimize available resources and gasoline consumption autonomy due to aerodynamic optimization, the study is necessary during the model design stage to assist decision-making regarding the definition of the format and the dimensions of the vehicle. To this end, fluid dynamic computational simulations were used, carried out using the Ansys software, with a focus on obtaining the drag ( $C_D$ ) and lift ( $C_L$ ) coefficients of the prototype for the conditions encountered on the track during competitions, with flows 25 and 40 km/h, in addition to visualizing flow characteristics. The methodology used was based on defining steps and standards for the process to facilitate the flow of simulations and analysis of results. A previous study of Ahmed's reference body (25° rear inclination) was developed to validate the simulations by comparing experimental and simulated data, in which a difference of 2.68% was obtained between the drag coefficients. Furthermore, a remarkable similarity was observed between the flow behaviors. In this way, valuable experience and information were obtained for correct configurations and development of the simulations. As for the Camelo II model of the prototype,  $C_D$  and  $C_L$  values equivalent to 0.0784 and -0.226 were obtained in the 25 km/h scenario, respectively, representing an aerodynamically efficient performance, which is reinforced when analyzing the interaction of the object fluid, in which the air has good adhesion and relatively low deflection.

**Keywords: Vehicle aerodynamics; CFD; Energy efficiency; SEM prototype.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Regimes de escoamento, em (a) laminar, em (b) transição e (c) turbulento .....	17
Figura 2 - Representação da condição de não escorregamento para um escoamento externo sobre uma placa .....	19
Figura 3 – Ângulo de separação x $C_D$ , em (a) $\theta=82^\circ$ e em (b) $\theta=120^\circ$ .....	21
Figura 4 – Força de resistência ao avanço de um veículo em função da velocidade .....	23
Figura 5 – Arrasto em função da velocidade .....	24
Figura 6 – Representação da área frontal de um veículo.....	25
Figura 7 – Coeficientes de arrasto e sustentação de diferentes corpos.....	25
Figura 8 – Redução do consumo de combustível através de arrasto aerodinâmico otimizado	27
Figura 9 – Consumo de combustível em função da potência do motor e do coeficiente de arrasto de um carro de corrida genérico em Hockenheimring .....	28
Figura 10 – Representação dos momentos e forças aerodinâmicas.....	29
Figura 11 – Representação do escoamento em um aerofólio com curvatura positiva.....	30
Figura 12 – Efeito da variação do ângulo de ataque nos $C_D$ e $C_L$ de três veículos .....	30
Figura 13 – Representação força de sustentação negativa .....	31
Figura 14 – Relação entre força de sustentação negativa e distância do solo .....	32
Figura 15 – Variação dos coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de derrapagem de um veículo de passeio.....	33
Figura 16 – Funções da aerodinâmica veicular de um carro de passeio.....	34
Figura 17 – Otimização de forma do veículo de pesquisa VW 2000 .....	35
Figura 18 – Representação do domínio computacional.....	38
Figura 19 – Erro Percentual x Relação de Bloqueio .....	39
Figura 20 – Em (a) triângulo equilátero, em (b) triângulo distorcido, em (c) quadrado equilátero e em (d) quadrado distorcido .....	41
Figura 21 – Proporção de aspecto para (a) triângulo e (b) quadrado .....	42
Figura 22 – Dimensões do Corpo de Ahmed.....	45
Figura 23 – Coeficiente de arrasto aerodinâmico em função do ângulo de inclinação da traseira do corpo .....	45
Figura 24 – Dimensões modelo Camelo II em (a) vista frontal e em (b) vista lateral .....	46
Figura 25 – Fluxograma da metodologia aplicada ao presente trabalho .....	47
Figura 26 – Corpos de influência (BOIs) .....	48
Figura 27 – Regiões do domínio computacional.....	49

Figura 28 – Possíveis geometrias das células de malha, (a) tetraedro, em (b) hexaedro, em (c) cunha, em (d) pirâmide e em (e) poliedro. ....	49
Figura 29 – Coeficiente de arrasto x número de células - Corpo de Ahmed.....	55
Figura 30 – Coeficiente de sustentação x número de células - Corpo de Ahmed .....	57
Figura 31 – Características do fluxo de ar do Corpo de Ahmed em (a) experimental e em (b) simulação .....	58
Figura 32 – Características do fluxo de ar do Corpo de Ahmed (simulação).....	59
Figura 33 – Qualidade ortogonal malha C do protótipo Camelo II, em (a) vista lateral e em (b) ampliação da região das rodas .....	60
Figura 34 – Coeficiente de arrasto x iterações .....	61
Figura 35 – Coeficiente de sustentação x iterações .....	62
Figura 36 – Residuais x iterações .....	62
Figura 37 – Coeficiente de arrasto x número de células - protótipo Camelo II .....	63
Figura 38 – Coeficiente de sustentação x número de células - protótipo Camelo II.....	64
Figura 39 – Intensidade de turbulência, em (a) 25 km/h e em (b) 40 km/h .....	65
Figura 40 – Tensão de cisalhamento na superfície do protótipo em (a) 25 km/h e em (b) 40 km/h .....	67
Figura 41 – Trajetórias das camadas de ar (40 km/h), em (a) vista lateral do plano de simetria e em (b) vista superior de um plano xz .....	68
Figura 42 – Trajetórias das camadas de ar (40 km/h), em (a) e (b) interação entre o fluido e as rodas .....	69
Figura 43 – Isosuperfície de velocidade no eixo z .....	70
Figura 44 – Separação de fluxo na parte traseira do protótipo .....	70
Figura 45 – Vetores de velocidade no plano $z=-1330$ mm (40 km/h) .....	71
Figura 46 – Perfil de velocidade no plano de simetria, em (a) 25 km/h e em (b) 40 km/h .....	72
Figura 47– Velocidade no plano de simetria do protótipo Aero@UBI03 .....	73
Figura 48 – Pressão estática na superfície do protótipo – vista lateral, 25 km/h.....	73
Figura 49 – Pressão estática na superfície do protótipo – vista lateral, 40 km/h.....	74
Figura 50 – Pressão estática na superfície do protótipo – vista frontal/lateral, em (a) 25 km/h e em (b) 40 km/h .....	74
Figura 51 – Distribuição da pressão estática no plano de simetria ao longo de z, 25 km/h .....	75
Figura 52 – Distribuição da pressão estática no plano de simetria ao longo de z, 40 km/h .....	76
Figura 53 – Coeficiente de arrasto de diferentes veículos.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Grau de Distorção e qualidade da célula.....	42
Tabela 2 – Distâncias do domínio computacional e dos corpos de influência em relação ao objeto de estudo .....	48
Tabela 3 – Configurações básicas dos principais grupos no estudo do protótipo .....	51
Tabela 4 – Parâmetro das malhas do Corpo de Ahmed .....	54
Tabela 5 – Malhas do Corpo de Ahmed x $C_d$ .....	55
Tabela 6 – Malhas do Corpo de Ahmed x $C_L$ .....	56
Tabela 7 – Parâmetros das malhas do modelo Camelo II.....	59
Tabela 8 – Malhas do modelo Camelo II x $C_D$ x $C_L$ .....	63
Tabela 9 – Distribuição de forças de diferentes veículos .....	66

## LISTA DE ABREVIATURAS

3D	Três dimensões
atm	Atmosfera
B	Relação de bloqueio
BOI	<i>Body of Influence</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
Cd	Coeficiente de arrasto
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
Cl	Coeficiente de sustentação
Dc	Domínio computacional
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
e	Distância do solo
FEM	<i>Finite Element Method</i>
Fl	Força de sustentação
FSI	<i>Fluid-structure Interaction</i>
FVM	<i>Finite Volume Method</i>
GEE	Gases de efeito estufa
hp	<i>Horse-power</i>
L	Comprimento
Mr	Momento de rolamento
My	Momento de guinada
Mp	Momento de inclinação
RANS	<i>Reynolds-averaged Navier-Stokes</i>
Re	Número de Reynolds
SEM	Shell Eco-marathon
V	Velocidade
yH	Altura da primeira camada limite

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta_w$	Ângulo de derrapagem
$A_x$	Área frontal
$A_{xdc}$	Área Frontal do domínio computacional
$C_D$	Coefficiente de arrasto
$C_L$	Coefficiente de sustentação
$F_D$	Força de arrasto
$F_L$	Força de sustentação
$\rho$	Massa específica
$\omega$	Taxa de dissipação de energia turbulenta
$\varepsilon$	Taxa de produção de energia turbulenta
$\theta$	Teta
$v$	Velocidade
$V_\infty$	Velocidade do escoamento livre
$\mu$	Viscosidade dinâmica

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>15</b>
	2.1 Objetivos específicos.....	15
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
	3.1 Características dos escoamentos.....	16
	3.2 Número de Reynolds.....	18
	3.3 Condição de não escorregamento .....	18
	3.4 Camada limite e separação de fluxo.....	19
	3.5 Arrasto .....	21
	3.6 Sustentação .....	28
	3.7 Força lateral .....	33
	3.8 Aerodinâmica veicular atual .....	34
	3.9 Método computacional .....	36
	3.9.1 Discretização .....	37
	3.9.2 Domínio computacional .....	38
	3.9.3 Malha 40	
	3.9.4 Modelos de turbulência .....	43
	3.10 Corpo de Ahmed .....	44
	3.11 Protótipo Camelo II .....	46
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>47</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DICUSSÕES .....</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>78</b>
<b>7</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A preservação ambiental e a demanda energética estão intrinsecamente interligadas. Embora as fontes renováveis como solar e eólica estejam mais disponíveis a cada dia, quanto mais energia consumimos mais dependemos de fontes não renováveis, como carvão, petróleo e gás. De maneira geral, a matriz energética global é composta por aproximadamente 84% de fontes não renováveis, acarretando significativos danos ao meio ambiente. Além disso, estima-se que o consumo mundial de energia está projetado para aumentar em 50% até 2050, impulsionado pelo crescimento populacional, urbanização e desenvolvimento econômico (IEA, 2021). Como resultado, a demanda por energia do transporte, incluindo carros, também deve aumentar.

Em 2019, o setor de transporte representou aproximadamente 32% da demanda global de energia e, observou-se que os carros são contribuintes significativos para o consumo de energia no setor, visto que caracterizam aproximadamente 70% da energia utilizada pelo transporte rodoviário (IEA, 2021). Em virtude de a grande maioria dos carros ainda possuírem motores de combustão interna movidos à combustíveis fósseis como gasolina e diesel, os quais emitem dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa (GEE), este setor mostra-se como um grande agente poluidor e contribuinte para o aquecimento global. Conforme estudo da *International Energy Agency* (2021), o transporte rodoviário é responsável por aproximadamente 20% das emissões globais de CO<sub>2</sub>, sendo os carros os maiores contribuintes. Portanto, reduzir a demanda de energia dos carros é crucial para mitigar o impacto das mudanças climáticas e preservar o meio ambiente para as gerações futuras.

No cenário Brasileiro, pode-se afirmar que praticamente metade das casas brasileiras possuem pelo menos um carro em sua garagem. Segundo Senatran (2023), a frota brasileira praticamente triplicou entre 2004 e 2020, passando de cerca 39 milhões para cerca de 108 milhões, o que representa um crescimento médio de 10% ao ano para este período e uma grande preocupação para os gestores públicos. Este aumento expressivo da frota traz novas variáveis ao contexto socioambiental, pois com uma quantidade maior de veículos circulando nas ruas, maior é a demanda de recursos naturais para produção de itens essenciais para o seu funcionamento como combustíveis e óleos, assim, elevando significativamente a demanda energética do país.

Ainda, no Brasil, é possível verificar que o mercado automobilístico sofreu consideráveis alterações nos últimos anos, influenciado por crises, crescimento nos

valores das matérias primas e questões políticas. Observou-se que os veículos 0 km tiveram grande acréscimo em seus preços praticados, o que fez com que grande parcela da população optasse pela compra de automóveis seminovos e usados, os quais apresentam um custo-benefício muito atrativo se comparados aos veículos novos. De acordo com Senatran (2023), a idade média da frota brasileira era de 9 anos e 7 meses em 2020, enquanto em 2021 este número aumentou para 10 anos e 3 meses (SINDIPEÇAS, 2021). Isso sugere que uma significativa parte dos veículos em circulação no Brasil é relativamente antiga, o que acarreta implicações em segurança no trânsito, emissões de poluentes e eficiência em termos de autonomia.

Segundo EPA (2022), estima-se que carros de passeio fabricado em 2019 emitem em média 66% menos óxidos de nitrogênio (NOx) e 99% menos partículas poluidoras do que carros do ano 2000. Além disso, a economia média de combustível dos carros mais novos aumentou significativamente ao longo das últimas décadas, o que implica também em menos GEE, como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Em geral, os veículos que atendem aos padrões de emissão mais recentes tendem a ter níveis de poluição mais baixos do que os veículos mais antigos, com a diferença se tornando mais significativa à medida que a idade do veículo aumenta. No entanto, a porcentagem específica de poluição atribuída a um determinado ano de fabricação pode variar com base em vários fatores, incluindo a marca e o modelo do veículo, o tipo de combustível utilizado, as condições de direção e o histórico de manutenção do veículo.

Em vista disso, a criação de projetos que abrangem o âmbito da engenharia mecânica, especialmente a produção de veículos, requer cuidado para garantir que o produto tenha uma vida útil adequada e não se torne obsoleto precocemente. Portanto, é fundamental que os projetos levem em consideração a evolução tecnológica e as tendências do mercado, a fim de garantir que os automóveis tenham uma longevidade significativa e continuem a atender às necessidades e às expectativas dos consumidores por um longo tempo. Ademais, os projetos devem se concentrar em reduzir a emissão de gases poluentes, garantindo que o automóvel seja ambientalmente sustentável e cumpra com as regulamentações governamentais vigentes. Para alcançar esses objetivos, é essencial que os projetos sejam baseados em pesquisas minuciosas e em constante atualização, bem como em práticas de engenharia eficientes e inovadoras.

Sendo assim, a partir da tendência mundial de aliar tecnologias à preservação ambiental, a aerodinâmica oferece um meio eficaz de abordar os desafios ambientais e promover o desenvolvimento sustentável. Ao aprimorar o desempenho aerodinâmico,

veículos e estruturas podem reduzir seu consumo de energia, resultando em emissões mais baixas e menor consumo de combustível.

A aerodinâmica é um aspecto fundamental da engenharia e desempenha um papel significativo em uma ampla gama de indústrias. Hoje, os princípios aerodinâmicos são utilizados para projetar e otimizar variados produtos e estruturas a fim de se obter máximo desempenho e eficiência. De automóveis e aeronaves a turbinas eólicas e trens de alta velocidade, a aplicação da aerodinâmica se tornou cada vez mais importante na engenharia moderna e com isso ferramentas relativamente novas como simulações fluidodinâmicas computacionais (CFD) são essenciais nesse processo.

Nos últimos 15 anos, a utilização de CFD se tornou imprescindível no processo de desenvolvimento de produtos graças ao notável progresso alcançado na tecnologia de hardware e software de computadores. Ela permite que engenheiros otimizem projetos sem que haja a necessidade de gastos com instalações e testes físicos como o túnel de vento, assim, sendo possível a visualização de interações fluido-objetos através de computadores. Portanto, ao se desenvolver projetos certificadamente eficientes, reduz-se ainda mais as emissões e o impacto ambiental causado (OBIDI, 2014).

O curso de Engenharia Mecânica do IFRS - *Campus* Erechim fomenta o desenvolvimento de projetos sustentáveis e inovações envolvendo veículos através de projetos de pesquisa. Participando das competições nacionais e internacionais realizadas pela Shell – a Shell Eco-marathon (SEM), o protótipo de eficiência energética do *campus* tem como principal objetivo atingir a máxima autonomia, isto é, percorrer a maior distância com o mínimo de combustível possível. Para isso, são desenvolvidos projetos nas mais diversas áreas da engenharia como chassi, motores à combustão, rolamentos, materiais e aerodinâmica.

O desenvolvimento do protótipo teve início no ano de 2015 e desde então se encontra em constante processo de aprimoramento. Novos testes e estudos, substituições de peças e incorporações de novos elementos ao veículo são exemplos de estratégias utilizadas para evolução do projeto (DE CRISTO, 2020). Desta maneira, o próximo projeto alvo do veículo é a concepção e produção de um monocoque em fibra de carbono, o qual eliminará o chassi de aço atual responsável pela parte estrutural, objetivando a redução de peso. Portanto, o próprio monocoque terá função estrutural, além de exercer a função de carenagem para o veículo.

Isto posto, visando-se a otimização dos recursos financeiros disponíveis pela instituição, bem como o desenvolvimento de um perfil aerodinamicamente eficiente para

o monocoque que cumpra seu objetivo e tenha uma longa vida útil, este trabalho propõe um estudo aerodinâmico através de simulações computacionais fluidodinâmicas – com vistas ao desenvolvimento da carenagem do veículo supracitado.

O estudo se mostra como potencial elemento de aprimoramento do protótipo, uma vez que a aerodinâmica pode ter influência significativa no consumo de combustível de um veículo. À medida que a velocidade aumenta, o fator de resistência que mais afeta um veículo é o arrasto aerodinâmico. Em baixas velocidades, esse fator é insignificante, mas quando a velocidade do veículo ultrapassa aproximadamente 60 km/h, ele supera a resistência ao rolamento e se torna o fator mais dominante em velocidades mais altas. Estimativas sugerem que a aerodinâmica pode influenciar até cerca de 40% no consumo de combustível (no caso de caminhões), dependendo de vários fatores, como o design do veículo, a velocidade de condução e as condições climáticas (SCHUETZ, 2016).

## 2 OBJETIVO GERAL

Apresentar um estudo aerodinâmico do perfil da carenagem do protótipo de eficiência energética do IFRS - *Campus* Erechim por meio de simulações computacionais fluidodinâmicas.

### 2.1 Objetivos específicos

- (a) Criar malhas de boa qualidade seguindo os parâmetros de distorção e qualidade ortogonal;
- (b) Configurar os cálculos via *software* para obtenção dos valores de Coeficiente de Arrasto ( $C_D$ ) e Coeficiente de Sustentação ( $C_L$ );
- (c) Validar a metodologia de simulação a partir do corpo de referência de Ahmed;
- (d) Realizar as simulações para as velocidades de 25 e 40 km/h e com direções de escoamento a  $0^\circ$  (paralelo),  $15^\circ$  e  $30^\circ$ ;
- (e) Realizar as análises das simulações.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A aerodinâmica é uma das ciências que estuda a interação de fluidos e sólidos, também conhecida como FSI (*Fluid-Structure Interaction*) – e envolve a aplicação dos princípios da mecânica dos fluidos, termodinâmica e dinâmica para obtenção e análise de dados como pressões, velocidades e forças, assim como, visa analisar o comportamento do fluxo de ar atuante sobre corpos sólidos. Para tanto, é necessário o conhecimento de alguns conceitos importantes.

Neste capítulo serão abordados conceitos fundamentais da aerodinâmica bem como das simulações fluidodinâmicas computacionais, visando um melhor entendimento acerca do assunto. Para embasar esses temas, é necessário um conhecimento amplo e atualizado da literatura existente. Neste sentido, uma revisão bibliográfica de livros e artigos relevantes é uma ferramenta valiosa.

#### 3.1 Características dos escoamentos

Os escoamentos de fluidos podem ser classificados de diversas formas, quanto à sua viscosidade, compressibilidade, planos dimensionais, regimes, entre outros. Um fluxo é denominado viscoso quando os efeitos de fricção são significativos. Esses efeitos surgem devido ao movimento relativo entre duas camadas de fluido, em que a camada mais lenta tende a desacelerar a camada mais rápida. Portanto, quanto maior for a desaceleração das camadas, maior o atrito gerado, em outras palavras, quanto mais viscoso o fluido, maior será a resistência ao movimento. No entanto, para regiões de fluxo nas quais o atrito gerado pela viscosidade é de pouca relevância, denominam-se fluxos invíscidos.

Se a densidade de determinado escoamento permanece constante ao longo do fluxo em dado período, este é caracterizado como um fluxo incompressível. Essa condição geralmente é observada em elementos líquidos, os quais apresentam pouca ou nenhuma compressibilidade em comparação aos gases. Estima-se que para uma variação de 0,01 atm em um fluxo de ar atmosférico, a densidade é alterada em cerca de 1% (ÇENGEL; CIMBALA, 2014).

O fluxo pode ser considerado uni, bi ou tridimensional com base no número de planos dimensionais necessários para descrevê-lo. Um escoamento unidimensional é um fluxo no qual as variáveis, como velocidade, pressão e temperatura, variam apenas em

uma direção espacial, normalmente observado em dutos ou tubulações. Quando as variáveis variam em duas direções espaciais, o fluxo é dito como bidimensional, como em estudos aerodinâmicos de placas e aerofólios. Já o escoamento tridimensional é o mais comum, encontrado em diversas aplicações como escoamentos sobre carros e aeronaves, nos quais as variáveis variam em três direções espaciais ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) (ÇENGEL; CIMBALA, 2014).

No âmbito da aerodinâmica, o escoamento pode descrever três tipos diferentes de movimento em torno de um objeto: laminar, turbulento e de transição. O fluxo laminar é um escoamento suave e constante, em que o fluido se move em camadas paralelas, com pouca ou nenhuma interferência entre elas, e é comumente observado em baixas velocidades e altas viscosidades. Já o escoamento turbulento é caracterizado pelo movimento desordenado e irregular do fluido, com altos níveis de turbulência e interferência entre as camadas, isto é, as partículas do fluido se movem em muitas direções e velocidades diferentes, muitas vezes formando redemoinhos e vórtices; este tipo de escoamento geralmente é observado em altas velocidades. A mistura destes dois tipos de escoamentos representa o fluxo de transição, em que o escoamento laminar está transitando para turbulento ou vice-versa (ÇENGEL; CIMBALA, 2014).

Figura 1 – Regimes de escoamento, em (a) laminar, em (b) transição e (c) turbulento



(a)



(b)



(c)

Fonte: ÇENGEL e CIMBALA (2014, p. 36).

### 3.2 Número de Reynolds

O Número de Reynolds (Re) é um valor adimensional que relaciona as forças de inércias e as forças de viscosidade de determinado fluido em escoamento em tubulações ou superfícies. O Re indica o tipo de movimento do fluxo que ocorrerá em um sistema de fluido, possibilitando certa previsão, isto é, a partir do número de Re é possível determinar se o escoamento é laminar, turbulento ou de transição. Para superfícies aerodinâmicas, o cálculo do Número de Reynolds é realizado através da Equação 1 (WHITE, 2011).

$$\text{Re} = \frac{\text{Forças de inércia}}{\text{Forças de viscosidade}} = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (1)$$

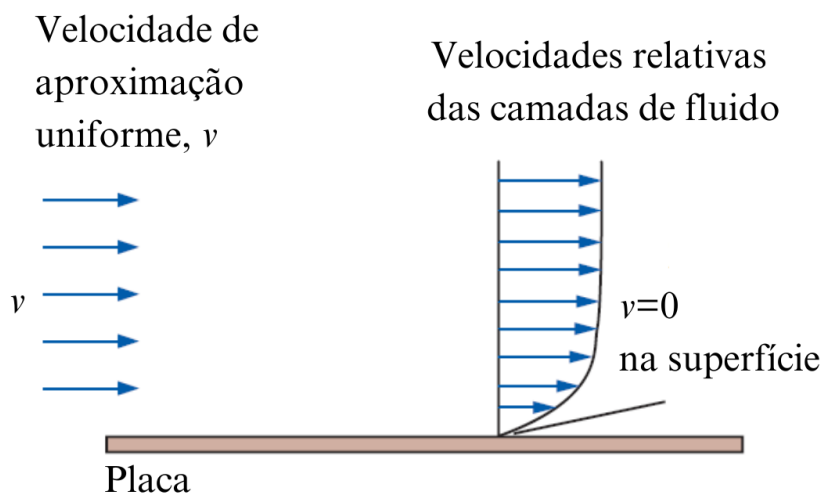
Segundo White (2011), em geral, um Re baixo indica um escoamento laminar, enquanto um Re alto indica um fluxo turbulento. O limite da transição de fluxo laminar para turbulento depende de uma variedade de fatores, incluindo a geometria do sólido, a velocidade e as propriedades do fluido.

Na aerodinâmica, por conta de o ar possuir uma viscosidade cinemática baixa -  $1,516 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$  a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (ÇENGEL; CIMBALA, 2014), geralmente são encontrados altos valores de Re, na casa de  $10^5$  a  $10^8$ , logo, caracterizando um escoamento turbulento, em que há a predominância de efeitos inerciais (SCHUETZ, 2016).

### 3.3 Condição de não escorregamento

A condição de não escorregamento descreve o comportamento de fluidos na interface com uma superfície sólida, em que as partículas do fluido em contato com a superfície não se movem ao longo da mesma, ou seja, a velocidade do fluido na superfície é zero. Isso leva ao desenvolvimento de uma camada na superfície, a qual retarda o escoamento do fluido devido ao atrito entre a superfície e o fluido. Como resultado, os perfis de velocidade possuem valores zero nos pontos de contato entre o fluido e a superfície sólida, e aumentam gradativamente à medida que se distanciam da superfície, até atingir o valor nominal do escoamento (ÇENGEL; CIMBALA, 2014).

Figura 2 - Representação da condição de não escorregamento para um escoamento externo sobre uma placa



Fonte: Adaptado de ÇENGEL e CIMBALA, (2014, p. 9).

### 3.4 Camada limite e separação de fluxo

Como posto acima, em interações fluido-sólido, a fina camada de fluxo adjacente às paredes do sólido em que os gradientes de velocidade são significativos é chamada de camada limite. Nela, há predominância de efeitos viscosos que produzem atrito entre o sólido e o ar circulante, resultando em diferentes velocidades e pressões do ar em comparação à região fora desta camada. Sendo assim, essa condição é responsável pela geração de arrasto de fricção, que representa a força que o fluido exerce sobre a superfície sólida na direção do fluxo (SCHUETZ, 2016).

A camada limite geralmente é quantificada por sua espessura, a qual depende de diferentes fatores como da magnitude da velocidade, viscosidade do fluido e rugosidade superficial do sólido. À medida que a velocidade aumenta a camada limite se torna mais fina, uma vez que devido ao aumento da velocidade se tem um menor tempo para o desenvolvimento das forças viscosas. Além disso, verifica-se que um Número de Reynolds elevado também representa uma diminuição na espessura da camada limite e, de forma semelhante, quanto maior a viscosidade menor será a espessura da camada limite, visto que um fluido viscoso tende a aderir às superfícies (OBIDI, 2014).

Além disso, verifica-se a influência da rugosidade superficial do sólido, que implica na velocidade do escoamento na região próxima ao objeto. Segundo Obidi (2014), uma superfície pouco rugosa permite um escoamento mais rápido e suave do fluido, em

comparação à uma superfície rugosa, a qual retarda o fluxo. Portanto, superfícies rugosas tendem a gerar espessuras maiores de camadas limite.

A espessura da camada limite possui influência direta no fluxo e, portanto, na interação fluido-sólido. Em geral, essa espessura é um fator importante para determinar a quantidade de arrasto sofrido por um sólido que se move através de um fluido, e, assim, minimizar este valor pode ser crítico no que tange o aprimoramento da eficiência aerodinâmica nas mais diversas aplicações.

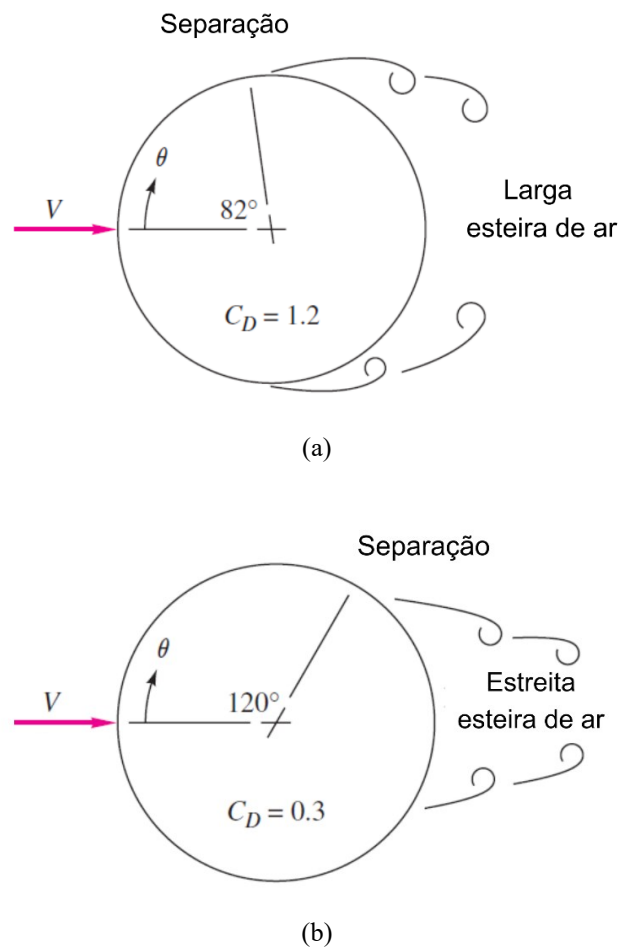
À medida que o fluido escoar mais distantemente da superfície sólida, maior é a espessura da camada limite. Nota-se que este aumento acaba por reduzir a velocidade do fluido nesta região em razão do acréscimo no arrasto de atrito experimentado pelo sólido. Ainda, em alguns casos, uma espessa camada limite acarreta uma probabilidade maior de ocorrência de separação de fluxo, desta forma, contribuindo para turbulências nas proximidades do corpo sólido (SCHUETZ, 2016).

A separação de fluxo, como o próprio nome já diz, é um fenômeno em que o escoamento adjacente à superfície sólida se desprende, criando uma região de turbulência. Este fenômeno recebe destaque no desenvolvimento aerodinâmico de aeronaves e veículos, visto que pode produzir efeitos significativos em relação ao desempenho no que diz respeito à estabilidade, controle e eficiência, interferindo diretamente no arrasto e sustentação experimentados pelos corpos (ÇENGEL; CIMBALA, 2014).

De acordo com Schuetz (2016, apud HUCHO, 2011), a separação de fluxo é responsável por grande parte do arrasto aerodinâmico em um veículo urbano. Portanto, mitigar a interferência causada a partir da redução deste fenômeno é fundamental para garantir um desempenho aerodinâmico eficiente.

A região do sólido em que ocorre a separação do fluxo ou, o ângulo de separação, também é de extrema importância para a aerodinâmica dos corpos. De maneira geral, quanto mais distante longitudinalmente do corpo ocorrer a separação de fluxo, menor será o arrasto experimentado pelo sólido. Isto é evidenciado a partir da Figura 3, em que temos dois ângulos de separação diferentes para uma esfera sólida,  $82^\circ$  e  $120^\circ$ , em outras palavras, em (a) a separação de fluxo ocorre na porção média no sentido longitudinal da peça, enquanto em (b) a separação é mais tardia. Desta forma, são relacionados os coeficientes de arrasto ( $C_D$ ) com os ângulos, observando-se um valor extremamente menor para um ângulo maior de separação (WHITE, 2011).

Figura 3 – Ângulo de separação x  $C_D$ , em (a)  $\theta=82^\circ$  e em (b)  $\theta=120^\circ$



Fonte: Adaptado de WHITE (2011, p. 486).

### 3.5 Arrasto

Seguramente, o arrasto é o principal elemento de estudo na aerodinâmica veicular. Estima-se que para um carro médio a 100 km/h em uma estrada plana, o arrasto representa cerca de 75 a 80% da resistência total ao movimento (SCHUETZ, 2016). Em tese, o arrasto pode ser descrito como a resistência que um fluido exerce sobre um corpo que se movimenta através dele e tem como principal causa as diferenças de pressões ao redor do objeto (ÇENGEL; CIMBALA, 2014). É um fator que impacta negativamente o consumo e a emissão de gases poluentes, visto que quanto maior for a força de arrasto maior será a energia requerida para superação dessa força. Além disso, possui impacto em relação à dirigibilidade e à estabilidade de veículos.

Segundo Obidi (2014), o arrasto de um corpo é composto pelo somatório dos diferentes tipos de arrasto presentes no sistema. De modo geral, o arrasto veicular pode

ser dividido em quatro subgrupos, que representam os principais efeitos observados, os quais são arrasto de pressão, fricção, interferência e indução.

O arrasto de pressão ou de forma é o arrasto predominante em um objeto que se move através de um fluido, representa cerca de 80% do arrasto total. Uma vez que o ar é forçado a escoar ao redor do corpo, são geradas diferenças de pressão ao redor da superfície, em que o formato e as dimensões do objeto determinam a magnitude da força de arrasto gerada sobre o sólido neste efeito. Portanto, o formato particular de cada corpo influencia o fluxo de uma maneira diferente, o que apresenta impacto direto na resistência aerodinâmica experimentada. Via de regra, o formato que apresenta o perfil mais eficiente é o de gota (OBIDI, 2014).

Em seguida, o segundo tipo de arrasto predominante no âmbito da aerodinâmica veicular é o arrasto de fricção, o qual representa cerca de 12% do arrasto total. Este tipo de arrasto é decorrente da fricção entre o fluido e a superfície do sólido, o que é gerado pelas das forças de cisalhamento na camada limite. Desta forma, quanto mais longa a superfície, maior será a camada limite e o desenvolvimento das forças cisalhantes, logo, maior será este tipo de arrasto (OBIDI, 2014).

O arrasto de interferência é o arrasto gerado pela influência de diferentes tipos de corpos que dividem o mesmo escoamento, ou seja, um objeto acaba alterando o escoamento experimentado por outro, seja em questões de turbulências ou de velocidades do escoamento. Geralmente é observado em elementos que possuem característica de saliência em relação ao corpo principal, como é o caso espelhos, maçanetas e limpadores de para-brisas nos veículos (SCHUETZ, 2016).

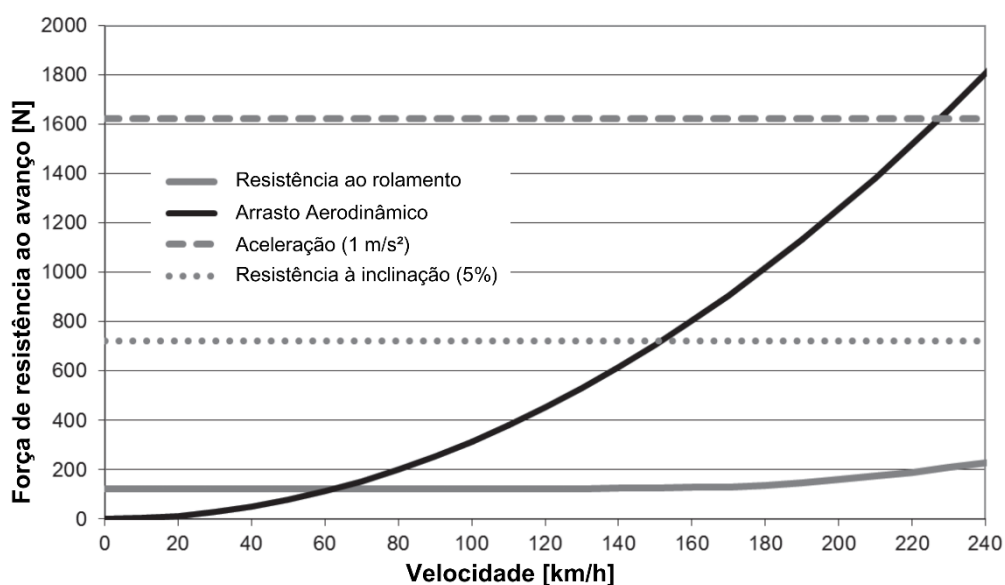
Já o arrasto induzido não possui tanta influência nos automóveis, contudo, todo corpo experiencia este tipo de arrasto em certo nível. A presença de vórtices no escoamento tende a gerar forças de sustentação, o que contribui para geração de arrasto. A força de arrasto, de modo geral, pode ser calculada através da Equação 2 (OBIDI, 2014).

$$F_D = C_D \times A_x \times \frac{\rho}{2} \times v^2 \quad (2)$$

Nota-se que o arrasto é diretamente proporcional à área frontal e ao coeficiente aerodinâmico do corpo, à metade da densidade e ao quadrado da velocidade do fluido, logo, a resistência experimentada pelo corpo cresce à medida que estas variáveis aumentam.

Em baixas velocidades, a fonte predominante de arrasto geralmente é a resistência à rolagem, a qual representa a força de atrito entre os pneus e a superfície da estrada. Contudo, à medida que a velocidade aumenta a contribuição do arrasto aerodinâmico se torna cada vez mais significativa. Como observado na Figura 4, a influência da velocidade na força de arrasto supera a resistência à rolagem em cerca de 60 km/h. Além disso, o arrasto gerado quando o veículo atinge uma velocidade de 190 km/h é praticamente dez vezes maior que para 60 km/h (SCHUETZ, 2016).

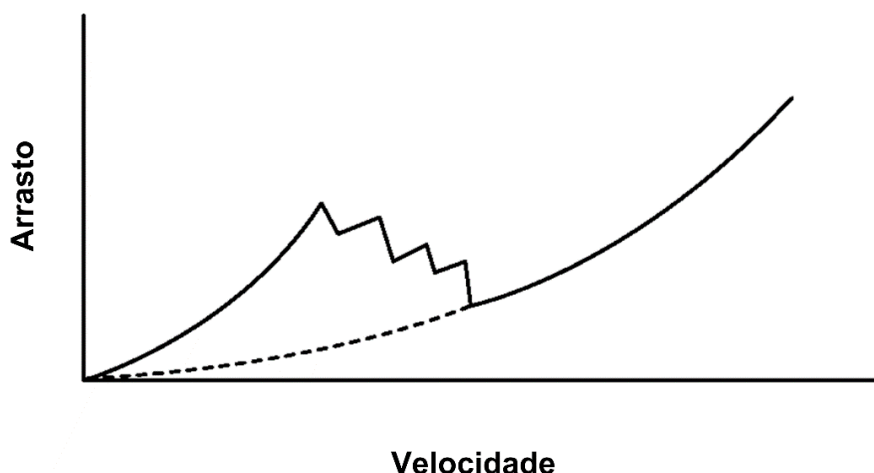
Figura 4 – Força de resistência ao avanço de um veículo em função da velocidade



Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016, p. 160).

Usualmente, o arrasto aumenta consideravelmente com o aumento da velocidade. Contudo, em certo ponto durante a transição de um fluxo laminar para turbulento o arrasto pode cair em certo nível mesmo com o aumento da velocidade (Figura 5). Isto se deve ao fato de que o fluxo turbulento é mais amplo que o laminar e representa um gradiente de pressão adverso mais forte, o que, durante a transição entre os escoamentos, acaba por reduzir momentaneamente a velocidade do fluxo fora da camada limite (OBIDI, 2014; ÇENGEL; CIMBALA, 2014).

Figura 5 – Arrasto em função da velocidade



Fonte: Adaptado de OBIDI (2014, p. 3).

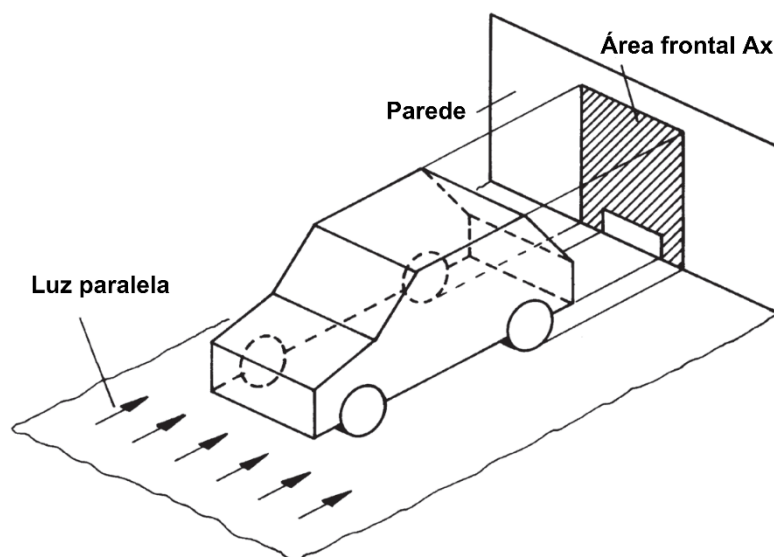
De acordo com Schuetz (2016), o arrasto aerodinâmico de um veículo é determinado através de sua área frontal e seu coeficiente de arrasto, avaliando-se o tamanho e a eficiência aerodinâmica do seu formato. No escopo da aerodinâmica veicular, não há variação significativa da viscosidade do ar, assim como a velocidade depende praticamente apenas do sistema de potência do veículo, possuindo pouca influência das outras variáveis. Todavia, uma carenagem otimizada aerodinamicamente, visando a redução de arrasto, pode permitir que o veículo alcance velocidades finais mais elevadas.

Assim como explica Dosil (2016), a área frontal e o coeficiente de arrasto são o foco principal no desenvolvimento aerodinâmico de protótipos ultraeficientes das competições Shell Eco-marathon. Reduzir a área frontal e desenvolver um perfil adequado para a carenagem são meios eficazes de minimizar os efeitos de arrasto aerodinâmico de um veículo.

Ao mover-se pelo ar, um corpo deve deslocar o fluido circundante a fim de progredir, o que resulta em uma distribuição desigual de pressão entre a parte dianteira e traseira, gerando arrasto. Sabe-se que a quantidade de massa de fluido deslocado é diretamente proporcional à área frontal do objeto, portanto, com uma área frontal maior, há mais moléculas de fluido sendo deslocadas. É por esse motivo que os caminhões possuem uma força de arrasto muito mais elevada que os carros de rua (WHITE, 2011).

A área frontal de um veículo é a representação da sua vista frontal em um plano normal ao escoamento, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Representação da área frontal de um veículo



Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016, p. 10).

O coeficiente de arrasto é o principal parâmetro de avaliação da aerodinâmica de corpos, o qual permite quantificar em termos de resistência, a aerodinâmica de objetos, permitindo a comparação entre diferentes corpos, como é verificado na Figura 7.

Figura 7 – Coeficientes de arrasto e sustentação de diferentes corpos

			$C_L$	$C_D$
1	Corpo de revolução de baixo arrasto		0	0.04
2	Veículo de baixo arrasto próximo ao solo		0.18	0.15
3	Automóvel genérico		0.28	0.35
4	Protótipo de carro de corrida		-3.00	0.75

Fonte: Adaptado de KATZ (2016, p. 263).

O coeficiente aerodinâmico ou de arrasto pode ser descrito como um valor adimensional que representa a quantidade de arrasto exercida sobre um corpo que se move através de um fluido, e é calculado através da Equação 3, que é uma variação da Equação

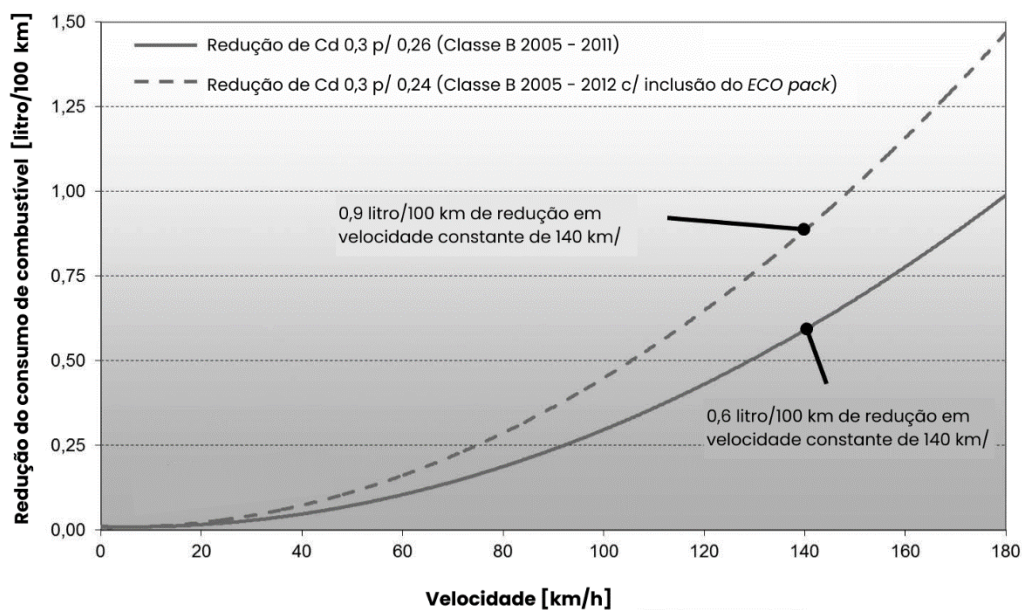
2. Desta forma, verifica-se que à medida que este valor se aproxima de zero, menor é a resistência experimentada pelo corpo, logo, melhor sua eficiência aerodinâmica (WHITE, 2011).

$$C_D = \frac{2 \times F_D}{A_x \times \rho \times v^2} \quad (3)$$

Segundo estudo conduzido por Schuetz (2016), analisou-se a redução do consumo de combustível em virtude da diminuição do coeficiente de arrasto do veículo Mercedes Classe B dos modelos ano 2011 e 2012 em comparação a um mais antigo, de 2005. O modelo predecessor possui um  $C_D$  equivalente a 0,30, enquanto os mais novos 0,26 (2011) e 0,24 (2012), representando um decréscimo no coeficiente de 13,5% e 20%, respectivamente. Foi observado que ambos os modelos mais recentes apresentaram redução do consumo de combustível, com destaque para o de 2012, sendo que para uma velocidade constante de 100 km/h apresentou uma redução de 0,45 L/100 km, enquanto o modelo de 2011 apresentou redução de 0,3 L/100 km. Além disso, verificou-se que a velocidade máxima atingida pelos modelos mais novos aumentou em praticamente 10 km/h.

É válido ressaltar que os níveis de economia supracitados também são tangíveis a partir da estratégia de redução de massa do veículo, o que, às vezes, é um processo um pouco mais simplificado para atingir tal objetivo. Entretanto, quando o veículo ultrapassa a velocidade de 140 km/h, a redução do consumo de combustível decorrente da estratégia de redução do  $C_D$  é quase impossível de ser alcançada através de outro método. Como exemplo, em uma velocidade constante de 180 km/h, o veículo do modelo 2012 chega a atingir uma redução de 1,5 L/100 km (SCHUETZ, 2016).

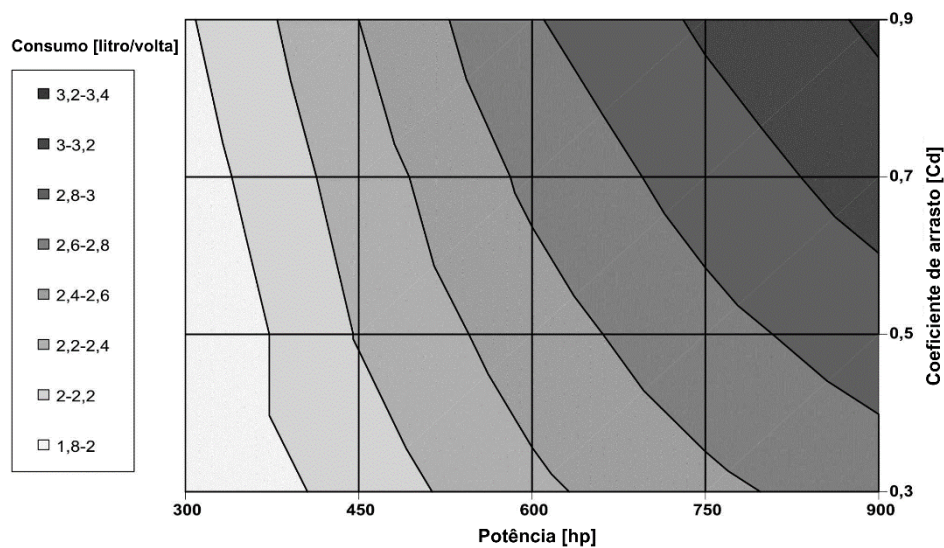
Figura 8 – Redução do consumo de combustível através de arrasto aerodinâmico otimizado



Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016, p. 187).

Quando se relaciona consumo, potência e coeficiente aerodinâmico de um veículo, verifica-se que um  $C_D$  menor resulta em um menor consumo de combustível independente da potência do veículo. Ademais, nota-se que mesmo com uma potência maior um veículo pode consumir menos combustível que outro de menor potência, sendo que, geralmente, quanto maior a potência maior a energia consumida. Isto pode ser observado através da Figura 9, relacionando um veículo de 750 hp e  $C_D = 0,3$  com outro de 600 hp e  $C_D = 0,65$ , em que há uma diferença de 0,2 a 0,4 litro/volta no consumo entre os dois veículos (SCHUETZ, 2016 apud PFADENHAUER, 2001).

Figura 9 – Consumo de combustível em função da potência do motor e do coeficiente de arrasto de um carro de corrida genérico em Hockenheimring



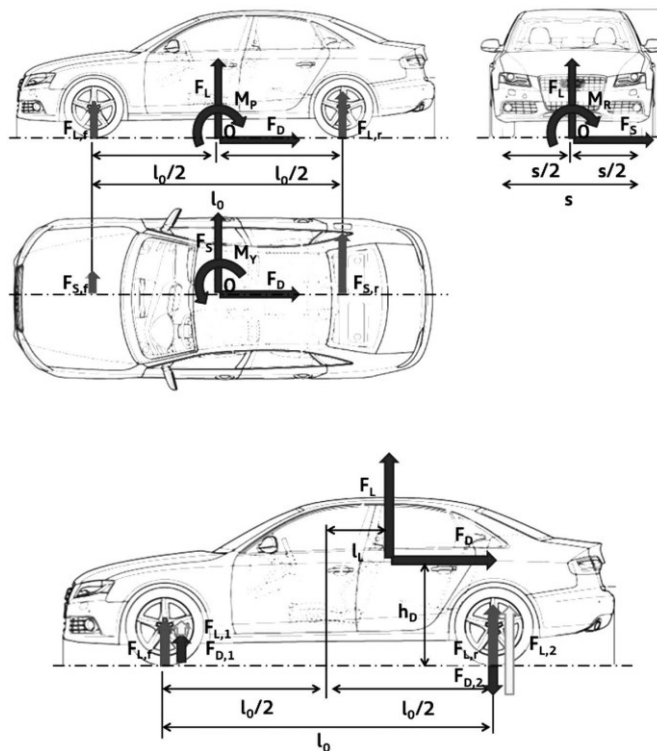
Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016, p. 638).

### 3.6 Sustentação

A força de sustentação é outro fator que possui relevante influência na dirigibilidade de veículos, uma vez que pode interferir diretamente no comportamento dinâmico desses corpos. Essa componente é capaz de reduzir ou elevar a força aplicada sobre os eixos dos veículos, o que influi na estabilidade, frenagem e direção (SCHUETZ, 2016).

Segundo Çengel e Cimbala (2014), a força de sustentação pode ser descrita como o somatório das forças de pressão e de cisalhamento presentes na parede do sólido que estão direcionadas normalmente ao escoamento. Além disso, observa-se que essas forças podem gerar momentos em relação à direção do fluxo, perpendicular ao escoamento e em relação à força lateral, os quais são denominados Momento de Rolamento ( $M_R$ ), Momento de Guinada ( $M_Y$ ) e Momento de inclinação ( $M_P$ ), respectivamente.

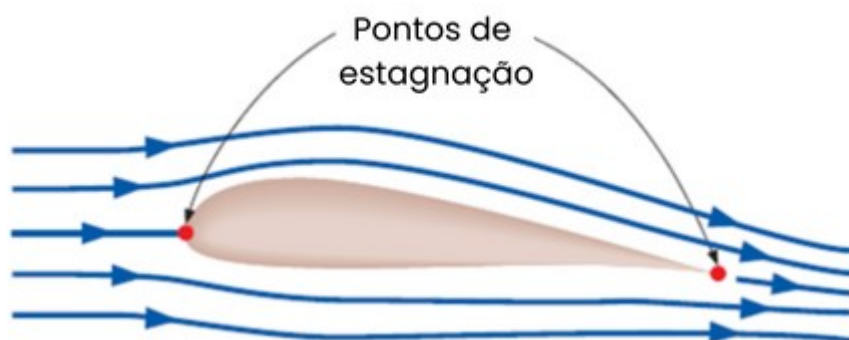
Figura 10 – Representação dos momentos e forças aerodinâmicas



Fonte: SCHUETZ (2016, p. 201).

O fenômeno da sustentação pode ser esclarecido através da correlação entre o princípio de Bernoulli, a ação e reação e a circulação de ar. Considerando-se um corpo de aerofólio com curvatura positiva, observa-se que o fluido é acelerado na superfície superior, criando uma região de baixa pressão, enquanto a superfície inferior apresenta uma pressão mais elevada, uma vez que possui menor velocidade – portanto, há uma diferença de pressão entre as partes. Além disso, o volume de ar é deslocado no ponto de estagnação frontal que direciona o fluxo para cima, já na parte traseira, este escoamento é direcionado para baixo, o que gera certa força sobre o corpo. Por fim, existe a condição em que as linhas de fluxo, superiores e inferiores, devem ser paralelas no ponto de estagnação posterior de um corpo, como o de aerofólio, devido à circulação de ar. Desta forma, estes três efeitos que ocorrem ao mesmo tempo geram uma força de reação contrária àquela exercida sobre o sólido devido ao escoamento, a qual, para este caso, representa uma força perpendicular ao escoamento e ascendente, denominada força de sustentação positiva (ÇENGEL; CIMBALA, 2014).

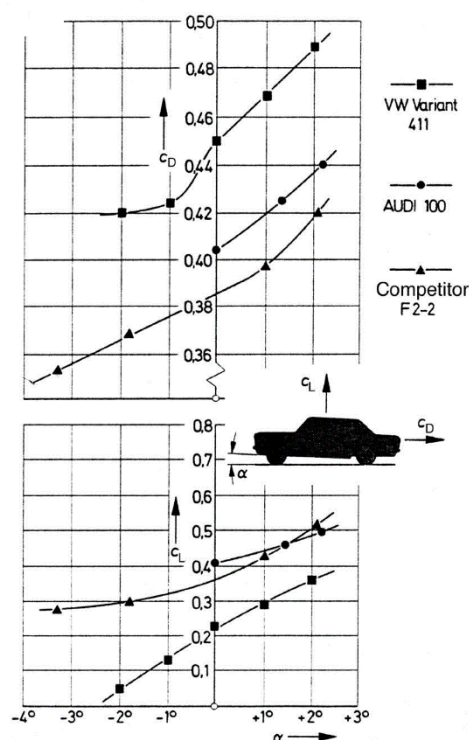
Figura 11 – Representação do escoamento em um aerfólio com curvatura positiva



Fonte: Adaptado de ÇENGEL e CIMBALA, (2014, p.635).

Na aerodinâmica veicular, a sustentação positiva cresce à medida que o ângulo de ataque do veículo aumenta, assim como o arrasto, e em proporções semelhantes. Segundo estudo conduzido por Janssen e Hucho (1973), verificou-se que um aumento de um grau no ângulo de ataque corresponde a cerca de 2% de aumento no arrasto e sustentação experimentados pelo corpo. Portanto, recomenda-se um ângulo ligeiramente negativo para redução desse efeito.

Figura 12 – Efeito da variação do ângulo de ataque nos  $C_D$  e  $C_L$  de três veículos

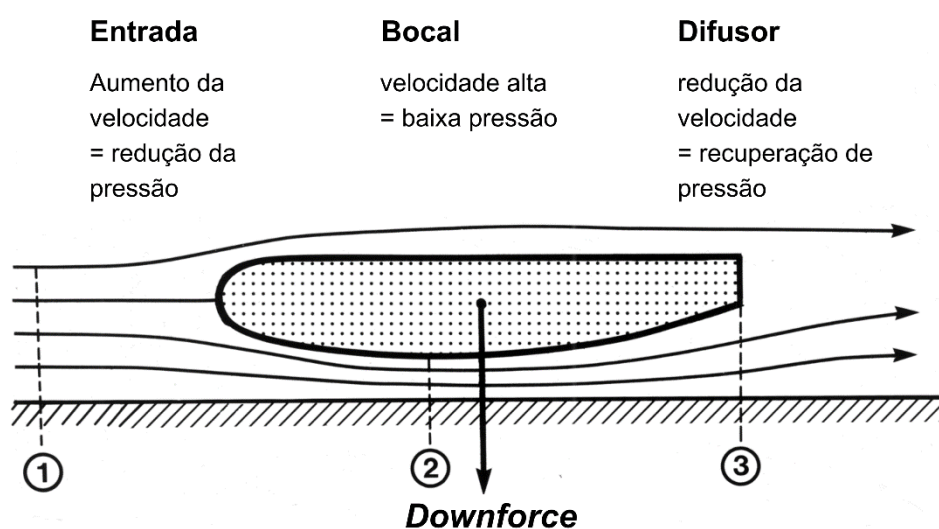


Fonte: SCHUETZ (2016 apud Janssen, 1973).

Nos casos em que a força de sustentação possui uma orientação descendente, denomina-se sustentação negativa, mais conhecida como *downforce*, do inglês. Essa força é responsável por gerar cargas adicionais nas rodas de um veículo, as quais criam um maior contato entre o pneu e o solo, enquanto a força de sustentação apresenta o efeito contrário. Desta forma, o *downforce* permite que automóveis atinjam maiores velocidades e acelerações laterais, facilitando o contorno de curvas, o que é desejável em carros de competição. No entanto, para automóveis de produção industrial as forças de sustentação e de arrasto devem ser reduzidas para que as características de dirigibilidade se mantenham inalteradas para uma grande faixa de velocidades, garantindo segurança e estabilidade de direção. Ainda, deve-se haver um balanço em relação à quantidade percentual de sustentação positiva ou *downforce* aplicados em cada eixo ou rodas para que se evitemos efeitos de subviragem e sobreviragem. (SCHUETZ, 2016).

A força de sustentação negativa é, em grande parte, decorrente da interação entre a superfície inferior do veículo e a estrada. A proximidade da parte inferior com o solo acaba por restringir o escoamento do fluido nesta porção, acelerando o ar e criando uma região de baixa pressão – este efeito é conhecido como efeito solo. Desta forma, verifica-se que o fluido acelera à medida que a distância do solo reduz, logo, o *downforce* cresce com a proximidade ao solo. Além disso, verifica-se que uma maior distância do ponto de estagnação frontal em relação ao solo gera um aumento na sustentação positiva (SCHUETZ, 2016).

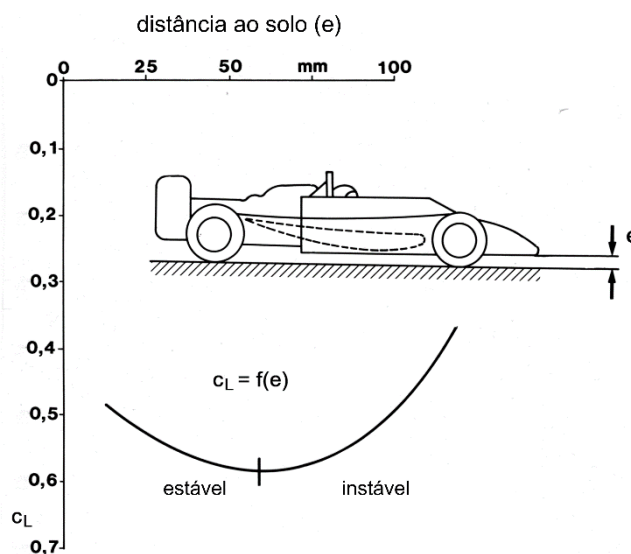
Figura 13 – Representação força de sustentação negativa



Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016, p. 683).

Contudo, em alguns casos, em que a distância em relação ao solo ( $e$ ) é muito reduzida, gera-se considerável arrasto induzido, o que acaba por reduzir a velocidade do fluxo, assim, diminuindo o *downforce*. Na Figura 14, verifica-se esta condição, em que observando uma distância de 25 mm e 50 mm, a menor distância representa um valor maior para  $C_L$ .

Figura 14 – Relação entre força de sustentação negativa e distância do solo



Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016, p. 684).

De forma similar à força de arrasto, a força de sustentação experimentada por um corpo é avaliada através de um número adimensional, o qual é denominado coeficiente de sustentação. Este valor pode ser positivo ou negativo, o que representa a força de sustentação positiva e o *downforce*, respectivamente. De acordo com, Schuetz (2016),  $C_L$  pode ser calculado por:

$$C_L = \frac{2 \times F_L}{A_x \times \rho \times v^2} \quad (4)$$

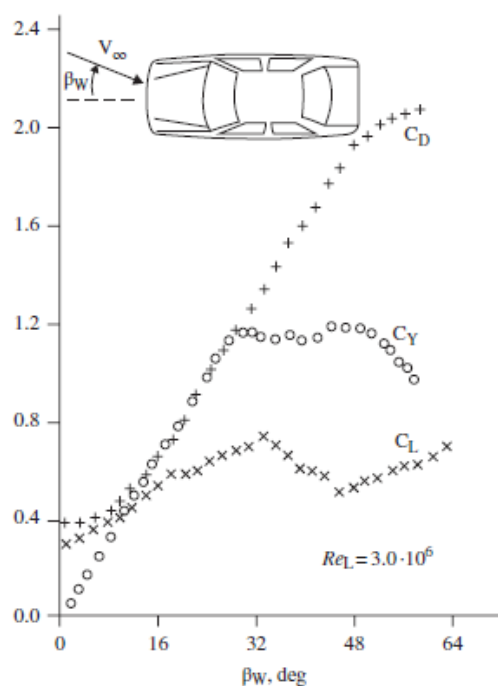
Observa-se que todo veículo apresenta tanto forças de sustentação positivas quanto negativas, e o somatório dessas componentes determina a predominância de forças ascendentes ou descendentes, isto é, se  $C_L$  é positivo ou negativo. Segundo Schuetz (2016), os coeficientes de sustentação de veículos de passeio como *sedans*, peruas, *hatchbacks*, conversíveis e *SUVs* são ligeiramente positivos. Além disso, observa-se certa relação entre  $C_D$  e  $C_L$ , em que um gera o aumento do outro e vice-versa.

### 3.7 Força lateral

É praticamente impossível um veículo experimentar apenas escoamentos na mesma direção em que se movimenta. Portanto, verifica-se a existência de fluxos oblíquos, os quais são decorrentes de massas de ar cruzadas ou de mudanças de direção do automóvel. Observa-se que esses fatores influenciam as forças laterais experimentadas pelo veículo, aumentando-as ao passo que são mais proeminentes, ocasionando o que se chama ângulo de derrapagem. Este ângulo possui a mesma magnitude do momento de guinada ( $M_Y$ ) (SCHUETZ, 2016).

Segundo Katz (2016), os coeficientes aerodinâmicos de veículos apresentam dependência da presença de fluxos oblíquos, assim como das forças de arrasto e sustentação, distância em relação ao solo e ângulo de ataque. A partir da Figura 15, são analisadas as variações de  $C_D$  e  $C_L$  em função do deslizamento lateral. Observa-se que quanto maior o ângulo de derrapagem ( $\beta_w$ ) maior será a área frontal do veículo, uma vez que o fluxo oblíquo atingirá uma porção maior do automóvel; em outras palavras, a área frontal original é somada à uma área lateral parcial à medida que aumenta o deslizamento lateral. Em razão disso, tanto o coeficiente de arrasto quanto o de sustentação aumentam com o ângulo de derrapagem.

Figura 15 – Variação dos coeficientes aerodinâmicos em função do ângulo de derrapagem de um veículo de passeio

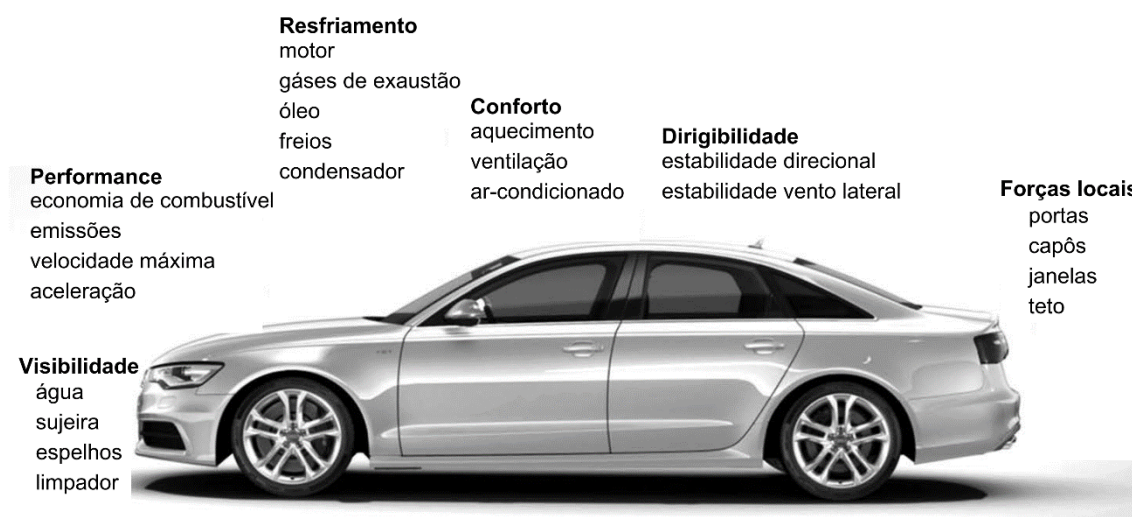


Fonte: KATZ (2016).

### 3.8 Aerodinâmica veicular atual

A aerodinâmica veicular abrange diferentes aspectos da funcionalidade veicular, além daqueles relacionados ao consumo de energia, velocidade máxima e dirigibilidade. Assim, apresenta não apenas características relacionadas ao desempenho, como também características relevantes quanto às funcionalidades básicas de um veículo - principalmente os de produção industrial, os quais se mostram uma ferramenta no cotidiano do homem contemporâneo. Desta forma, a aerodinâmica também é explorada em aspectos de visibilidade, conforto e resfriamento dos sistemas de potência e freios, redução do acúmulo de sujeiras e água nos espelhos e para-brisas, proporcionando uma ventilação e climatização interna adequada, e garantindo maior segurança e durabilidade à máquina (SCHUETZ, 2016).

Figura 16 – Funções da aerodinâmica veicular de um carro de passeio

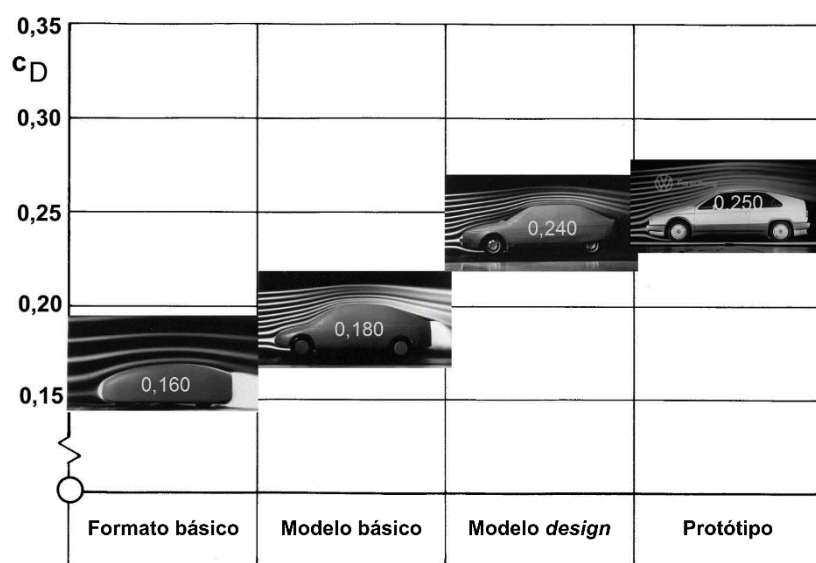


Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016, p. 2).

Quanto à concepção do *design* de veículos de produção industrial, são considerados aspectos aerodinâmicos, de segurança, produção, itens de série e regulamentações. No entanto, o fator predominante que determina o formato original desses tipos de veículo é a estética, responsável por gerar boa aceitação por parte dos consumidores e consequente venda facilitada, principalmente no mercado brasileiro. Apesar de a aerodinâmica não ser o foco, nota-se que os coeficientes de arrasto de veículos comerciais têm diminuído com o passar dos anos (SCHUETZ, 2016).

Após a definição de seu formato inicial, geralmente são utilizadas duas abordagens para o aprimoramento de seu desempenho, seja para questões envolvendo eficiência energética quanto para dirigibilidade, que são a otimização de detalhe e a otimização de forma. A otimização de detalhe envolve pequenas e pontuais alterações em detalhes da forma do objeto, como por exemplo em espelhos, saias e aerofólios. Essas alterações podem contribuir efetivamente para um melhoramento, mas são limitadas pela forma geral do objeto. Já a otimização de forma parte de um formato básico, em que são implementadas necessidades de projeto e adequações nas etapas posteriores, portanto, não possui limitação quanto à forma e considera um número muito maior de variáveis, representando melhorias significativamente maiores em relação à otimização de detalhe. Ambas as abordagens são utilizadas na indústria, inclusive concomitantemente, o que depende do estágio em que o projeto se encontra. A otimização de detalhe é visualizada com frequência nas etapas finais dos desenvolvimentos, enquanto a otimização de forma nos iniciais (SCHUETZ, 2016).

Figura 17 – Otimização de forma do veículo de pesquisa VW 2000



Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016, p. 56).

Para casos mais extremos, em que a performance do veículo é mais relevante que todos os outros fatores mencionados acima, sem que haja negligência quanto à segurança e regulamentações, é utilizada a estratégia limite. De forma geral, esta técnica é utilizada na criação de *designs* veiculares em termos de aerodinâmica, e envolve a otimização de todos os aspectos do carro a fim de melhorar sua dinâmica em pista, portanto, as soluções

técnicas são desenvolvidas para se aproximar ao máximo do limite tangível. Assim, o foco central do desenvolvimento são as características aerodinâmicas do veículo (SCHUETZ, 2016).

A estratégia limite pode ser observada, além de em carros de corrida, no desenvolvimento de veículos ultraeficientes, como é o caso do protótipo de eficiência energética do IFRS – *Campus Erechim*, em que se tem como objetivo principal a redução do consumo de combustível e, para isso, a carenagem apresenta significativa contribuição para obtenção de tal objetivo.

No desenvolvimento do *design* de veículos, as três abordagens supracitadas utilizam recursos tecnológicos e/ou experimentais para estudo e avaliação da qualidade dos formatos desenvolvidos, como simulações fluidodinâmicas computacionais, testes em túneis de vento e testes em pista.

### **3.9 Método computacional**

A simulação fluidodinâmica computacional, mais conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*), se tornou uma importante ferramenta para o desenvolvimento de perfis aerodinâmicos a partir da evolução dos computadores, uma vez que essa técnica demanda um alto processamento de dados devido à complexidade dos cálculos numéricos (EIKELAND, 2010).

Através da simulação computacional é possível visualizar os efeitos do fluxo de um fluido sobre determinado objeto sem que haja a necessidade de custos com instalações físicas, como túneis de vento, por exemplo. Dentre as características que podem ser visualizadas nesta técnica aplicada para escoamentos externos, destacam-se a velocidade do fluxo, a pressão exercida sobre o objeto, a separação da camada limite, a presença de turbulências e os coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação; pois, são fatores essenciais para o desenvolvimento de um bom perfil aerodinâmico.

Segundo Obidi (2014), os três principais métodos de avaliação da aerodinâmica veicular são os testes em túnel de vento, testes em estrada e o método computacional, em que a adoção de um determinado método depende, em grande parte, do estágio em que o projeto se encontra.

Observa-se que o método CFD e o teste em túnel de vento apresentam praticamente os mesmos objetivos e funções, com abordagens diferentes – físico e

computacional. Contudo, o método computacional apresenta diversos benefícios como redução no ciclo de desenvolvimento do produto, baixo custo, sem limitações dimensionais, rápida avaliação aerodinâmica de alterações realizadas e especialmente útil no início da concepção do produto. Já os testes em túneis de vento, apresentam elevados custos de instalação e de funcionamento, limitações físicas quanto ao tamanho, além de interferência nos resultados através das ferramentas utilizadas para coleta de dados. Os testes em estrada, assim como os túneis de vento, apresentam elevado custo de implantação e interferência dos instrumentos; além disso, verifica-se um longo tempo de configuração do sistema, dependência do clima e, portanto, uma faixa limitada de condições de escoamentos (SCHUETZ, 2016).

### 3.9.1 Discretização

As simulações fluidodinâmicas computacionais buscam replicar a física real e experimental em um ambiente virtual, utilizando-se de equações matemáticas fundamentais que descrevem os comportamentos dos fluidos. Essas equações contêm diversas variáveis que variam ao longo do tempo e que se correlacionam entre si, assim, são passíveis de solução matemática através de equações diferenciais parciais.

A discretização é o cerne das simulações computacionais e consiste no processo de divisão do domínio físico em subdivisões menores. É como se o problema fosse analisado através da ótica de uma lupa que, ao remover-se a lupa, observa-se o problema numa escala macro. A visão macro representa a chamada malha, a qual é o conjunto das pequenas porções do domínio e que consiste no agrupamento de diversos elementos finitos.

Os elementos finitos podem ter várias formas como tetraedros, hexaedros, triângulos, o que dependerá da natureza do problema e da complexidade da geometria analisada. Além disso, cada elemento finito possui propriedades físicas, como viscosidade, condutividade térmica e rigidez mecânica. Desta forma, as equações que governam o comportamento do fluido são resolvidas numericamente através da transformação de coordenadas globais para pontuais, em que a solução geral é aproximada e obtida através da combinação das soluções pontuais. Ou seja, as Equações Diferenciais Parciais (EDPs) são convertidas em equações algébricas (SCHUETZ, 2016).

Dentre os tipos de discretização utilizados em estudos, os métodos de elementos finitos (*finite elements method* – FEM) e de volume finito (*finite volume method* – FVM)

apresentam maior relevância na área de simulações computacionais. Isto se deve à versatilidade e adaptação a geometrias complexas, preservação de propriedades físicas e o suporte computacional robusto destes métodos (SCHUETZ, 2016).

O método FEM divide o domínio em elementos finitos, aproximando a solução para cada elemento, concentrando-se nas propriedades locais dos elementos. Já o método FVM divide o domínio em volumes de controle, aproximando as equações de conservação dentro desses volumes (FERZIGER, 2002).

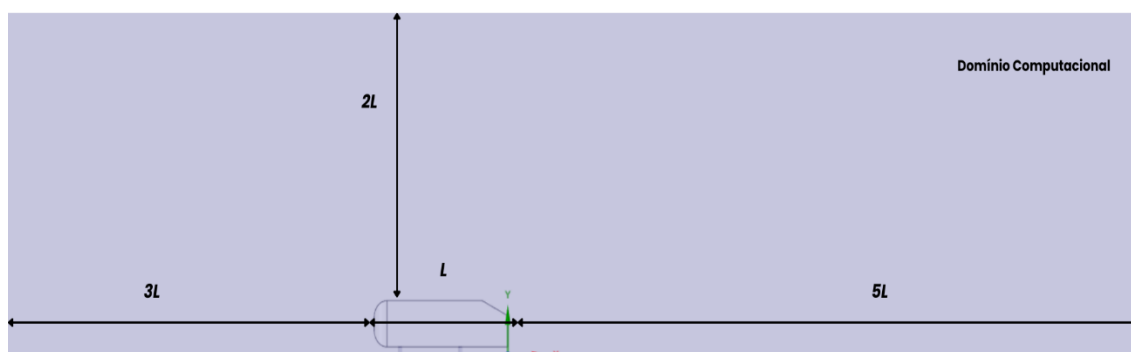
Segundo Schuetz (2016), o método FVM possui flexibilidade quando utilizado em geometrias complexas e tem a vantagem de consumir menos memória e processamento computacional se comparado ao FEM.

### 3.9.2 Domínio computacional

O domínio computacional é a região do espaço físico onde o problema deve ser simulado e analisado. Nas simulações fluidodinâmicas computacionais de automóveis rodoviários, na maioria dos casos, busca-se replicar um túnel de vento como domínio computacional. Desta forma, o objeto de estudo é envolto por um invólucro, sendo delimitado por fronteiras físicas.

Para satisfazer as condições de análise do escoamento, facilitar a convergência e a precisão dos resultados, o domínio requer certo tamanho mínimo, do qual se encontram diversas sugestões em relação ao tamanho deste domínio. Segundo Lanfrit (2005), o domínio computacional deve possuir ao menos 3 comprimentos do objeto à frente e 5 comprimentos na parte traseira.

Figura 18 – Representação do domínio computacional



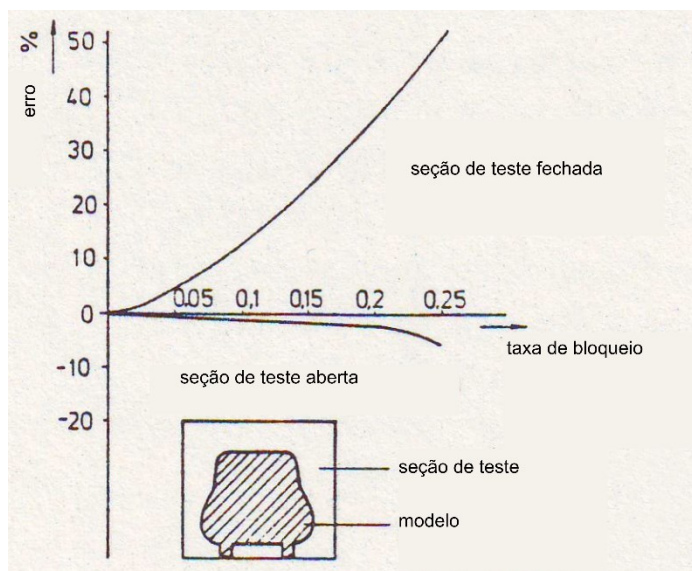
Fonte: O Autor (2023).

Outro fator a ser observado com cuidado na realização de simulações computacionais fluidodinâmicas e em testes em túneis de vento é a relação de bloqueio, a qual pode impactar diretamente os resultados dos estudos. O bloqueio é uma restrição da área da seção de testes em túneis de vento e domínios computacionais, que reduz a área do fluxo de ar e é uma das principais causas de erros nas realizações nesses tipos de testes. Pode-se observar o efeito deste bloqueio através da Equação de Conservação da Massa (Eq. 5), em que o fluxo é acelerado ao redor da superfície do sólido quando há uma diminuição da área – para uma massa específica constante.

$$\rho A_1 v_1 = \rho A_2 v_2 \quad (5)$$

Esta diminuição da área se deve ao fato do bloqueio parcial do fluxo. Desta forma, o arrasto tende a ser superestimado, aumentando-se o erro de acordo com a relação de bloqueio, como é evidenciado na Figura 19 que exibe um estudo realizado em túneis de vento de diferentes tipos, de seção fechada e de seção aberta. (EIKELAND, 2010).

Figura 19 – Erro Percentual x Relação de Bloqueio



Fonte: Adaptado de EIKELAND (2010 apud Kramer; Gerhardt, 1984).

A relação de bloqueio (B) pode ser calculada dividindo-se a área frontal do veículo sobre a área frontal do domínio computacional e, para ser considerada aceitável, deve estar abaixo 10% para que os erros apresentem pouca influência nos resultados obtidos nas medições (EIKELAND, 2010).

$$B = \frac{A_x}{A_{xdc}} \times 100\% \quad (6)$$

### 3.9.3 Malha

A escolha do tipo de elemento depende principalmente da complexidade da geometria e dos recursos computacionais disponíveis. De acordo com ANSYS (2016), deve-se utilizar malhas quadriláteras/hexaédricas para geometrias simples; malhas quadriláteras/hexaédricas não estruturadas para geometrias moderadamente complexas; malhas de prisma com base triangular/tetraédrica para geometrias relativamente complexas; malhas triangulares/tetraédricas puras para geometrias extremamente complexas. Não obstante, as malhas poliédricas apresentam grande vantagem em comparação às malhas tetraédricas: a quantidade de células necessárias é cerca de 3 a 5 vezes menor, levando à uma redução do tempo computacional da simulação e, ainda, apresenta aumento da precisão nos resultados.

É importante ressaltar que, no *software* Fluent Meshing, a escolha dos elementos é realizada na etapa de geração da malha de volume, em que existem quatro opções disponíveis: *tetrahedral* (tetraédrica), *hexcore*, *polyhedral* (poliédrica) e *poly-hexcore*.

A malha *hexcore* é um esquema de malha híbrida que gera células cartesianas alinhadas ao eixo dentro do núcleo do domínio e células tetraédricas próximas aos limites. Refinamentos de nó suspenso (ou H-) nas células cartesianas permitem uma transição de tamanho de célula eficiente do limite para o interior do domínio. Isso resulta em menos células com automação total e pode lidar com geometrias complexas, paredes internas e lacunas (ANSYS, 2021a).

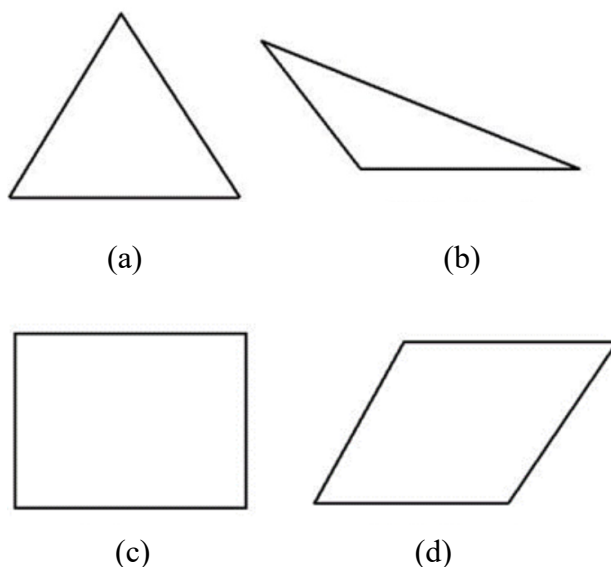
A qualidade da malha, assim como de seus elementos, possui significativo impacto na precisão da solução numérica. À vista disso, devemos verificá-la antes de iniciar a solução e, para tanto, diferentes parâmetros podem ser utilizados. Dentre os principais parâmetros de qualidade estão qualidade ortogonal (*orthogonal quality*), distorção ou assimetria (*skewness*) e proporção de aspecto (*aspect ratio*) (ANSYS, 2021a).

A qualidade ortogonal das células é calculada com base na assimetria celular e no vetor do centroide para cada uma de suas faces. Infere-se que, quanto mais próximo de 0 for o valor da sua qualidade ortogonal, pior será a célula, enquanto as melhores células terão valores mais próximos de 1. Empiricamente, a qualidade ortogonal mínima para

todos os tipos de células deve ser superior a 0,01, com um valor médio significativamente maior (ANSYS, 2021a).

A assimetria refere-se à proximidade que uma célula ou face possui em relação ao ideal, em termos de propriedades equiláteras ou equiangulares (ANSYS, 2021a). As Figuras 20 (a) e (c) exibem um triângulo e um quadrado equilátero, enquanto (b) e (d) representam as geometrias distorcidas.

Figura 20 – Em (a) triângulo equilátero, em (b) triângulo distorcido, em (c) quadrado equilátero e em (d) quadrado distorcido



Fonte: Adaptado de ANSYS (2021a).

Em termos de assimetria, um valor 0 se refere a células de melhor qualidade (equilátera) e um valor 1 indica células completamente distorcidas. Células distorcidas ou degeneradas são caracterizadas pela presença de nós praticamente coplanares. As células com um valor de assimetria acima de 1 são inválidas. Deste modo, faces e células altamente distorcidas devem ser evitadas, pois podem levar a resultados menos precisos se comparados aos obtidos com o uso de faces e células relativamente equiláteras. Na prática, a assimetria máxima da célula deve ser mantida abaixo de 0,95 e possuir um valor médio significativamente menor. Um valor máximo acima de 0,95 pode acarretar dificuldades de convergência na solução numérica (ANSYS, 2021a). A Tabela 1 relaciona os intervalos de assimetria às suas respectivas qualidades de célula.

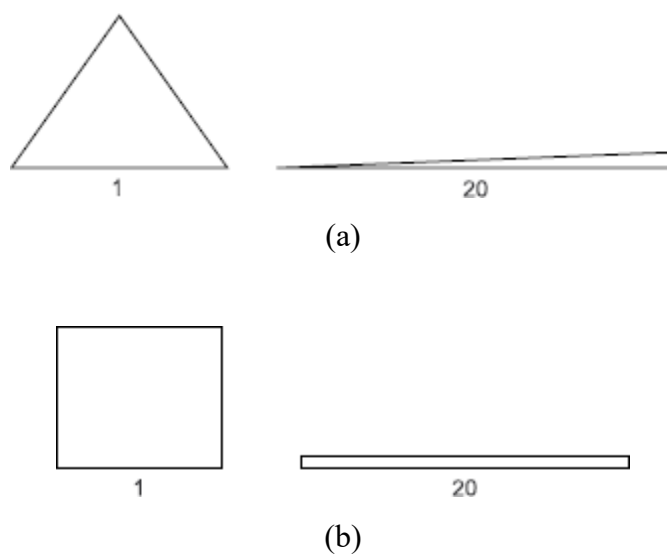
Tabela 1 – Grau de Distorção e qualidade da célula

Distorção	Qualidade da célula
1	Degenerado
0,9 - <1	Ruim
0,75 - 0,9	Pobre
0,5 - 0,75	Regular
0,25 - 0,5	Bom
>0 - 0,25	Excelente
0	Equilátero

Fonte: ANSYS (2021a).

A proporção do aspecto é uma medida do alongamento da célula obtida pela relação entre o comprimento da aresta mais longa e da mais curta. Assim como a distorção, a proporção de aspecto é utilizada para verificar quão longe a célula está de ser ideal. Para este critério, têm-se um elemento ideal quando seu valor for igual a 1 e, quanto maior for seu valor de proporção pior será a qualidade da célula (ANSYS, 2021a).

Figura 21 – Proporção de aspecto para (a) triângulo e (b) quadrado



Fonte: ANSYS (2021b).

### 3.9.4 Modelos de turbulência

Os modelos de turbulência são ferramentas matemáticas e computacionais utilizadas em simulações CFD com a finalidade de minimizar a complexidade da turbulência, a qual pode ser descrita como um comportamento altamente irregular e caótico que é observado em variados fluxos de fluidos. Esses modelos desempenham um papel fundamental na simplificação e na obtenção de resultados realistas das simulações.

Como explicado anteriormente, as equações de Navier-Stokes que descrevem o comportamento dos fluidos são transformadas em equações algébricas no método de discretização. Contudo, essas equações apresentam dificuldade de resolução quando há presença de turbulências no fluxo, especialmente em geometrias complexas, como nos casos de automóveis rodoviários. Ainda, este método, denominado Simulação Numérica Direta (*Direct Numerical Simulation* – DNS), necessita um elevado nível de detalhamento do fluxo devido à vasta gama de comprimento das turbulências, tornando computacionalmente custosa a resolução destas equações (DOSIL, 2016). De acordo com Eikeland (2010), o método DNS não costuma ser utilizado nas indústrias, apenas para estudos conceituais de turbulência.

Desta forma, foram criados modelos de turbulência a fim de simplificar e de certa forma prever o comportamento das turbulências a partir de equações adicionais que estimam os efeitos médios da turbulência. Assim, permite-se que as simulações CFD forneçam resultados razoavelmente precisos com uma quantidade consideravelmente menor de recursos computacionais.

Dos variados modelos de turbulência disponíveis, o mais utilizado em análises aerodinâmicas de escoamento externo é o modelo RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes). A abordagem RANS visa calcular a média dos efeitos da turbulência ao longo do tempo, resultando em um conjunto de equações que descrevem as propriedades médias do fluxo como velocidade, pressão e temperatura, e as propriedades turbulentas como viscosidade turbulenta e energia cinética turbulenta, separadamente. O modelo RANS, assim como outros, possui variações ou modelos adicionais, os quais são empregados para representar as quantidades turbulentas. Dentre esses modelos, os mais utilizados são o modelo de turbulência k-épsilon ( $k-\varepsilon$ ) e k-ômega ( $k-\omega$ ), devido à capacidade de modelar a turbulência de forma precisa e versátil (SCHUETZ, 2016).

No modelo  $k-\varepsilon$  são resolvidas duas equações adicionais, uma para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para a taxa de produção de energia turbulenta ( $\varepsilon$ ). A equação

para  $k$  descreve a quantidade de turbulência presente no fluxo, enquanto a equação para  $\varepsilon$  modela como essa turbulência é produzida. Este modelo costuma ser empregado em escoamentos com baixa ou moderada intensidade de turbulência, aplicações em que não há grande separação de fluxo ou zonas recirculantes e em geometrias relativamente simples (BLAZEK, 2015).

Assim como no modelo  $k$ - $\varepsilon$ , o modelo  $k$ - $\omega$  resolve duas equações adicionais, além de  $k$ , existe outra para a taxa de dissipação de energia turbulenta ( $\omega$ ), o que representa a quantidade de energia que é dissipada pela viscosidade do fluido. Este modelo é adequado para fluxos de alta intensidade de turbulência, portanto, é empregado em escoamentos em que há maior intensidade turbulenta, separação de fluxo, recirculação ou fortes gradientes de velocidade, além de geometrias complexas (BLAZEK, 2015).

Visando reunir as características positivas dos modelos  $k$ - $\varepsilon$  e  $k$ - $\omega$ , foi criado o modelo  $k$ - $\omega$  SST, que permite prever perfis de turbulência em diferentes condições de fluxo. Este modelo emprega diferentes abordagens de acordo com a região de análise; em regiões de camada limite, próximas ao sólido, o modelo SST utiliza  $k$ - $\omega$ , enquanto para regiões fora da camada limite utiliza  $k$ - $\varepsilon$ . Deste modo, o modelo  $k$ - $\omega$  SST possibilita uma ampla gama de aplicação nas simulações fluidodinâmicas computacionais com boa precisão e eficiência (BLAZEK, 2015).

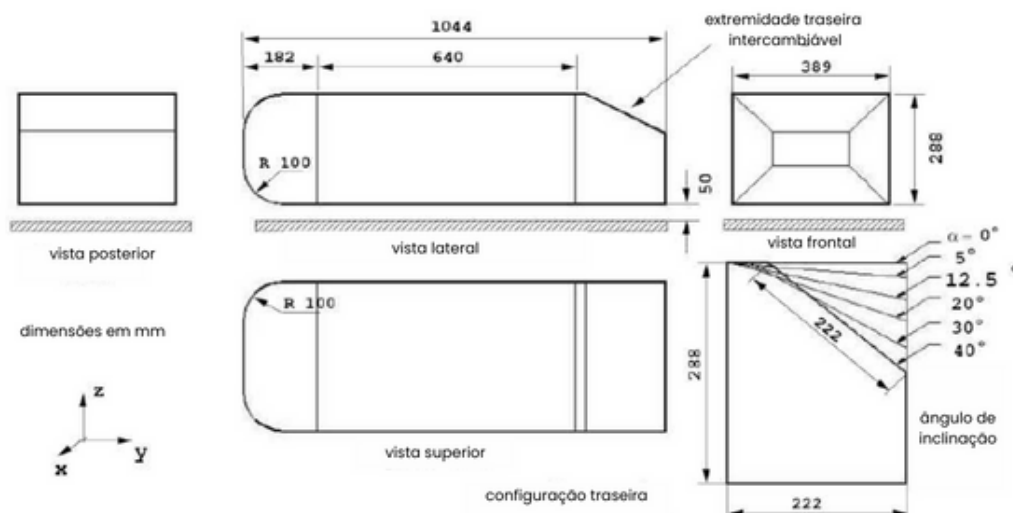
### 3.10 Corpo de Ahmed

Formatos simplificados de geometrias automotivas são utilizados com o intuito estudar o comportamento do fluxo de ar, permitindo a visualização de fenômenos aerodinâmicos importantes como separação de fluxo e zonas de recirculação à um custo computacional relativamente menor se comparado a uma geometria real de um veículo. Além disso, por ter um elevado número estudos e dados experimentais disponíveis, estes formatos atuam como referência e validação de análises aerodinâmicas através de simulações computacionais (SCHUETZ, 2016).

Devido a quantidade de dados acessíveis, o denominado Corpo de Ahmed é o formato de referência utilizado em grande escala atualmente. Este corpo foi desenvolvido por Ahmed et. al visando reproduzir os diferentes efeitos aerodinâmicos em um veículo automotivo, analisando-se estes efeitos a partir da alteração de geometrias no formato, mais especificamente no ângulo de inclinação da parte traseira (AHMED et. al, 1984).

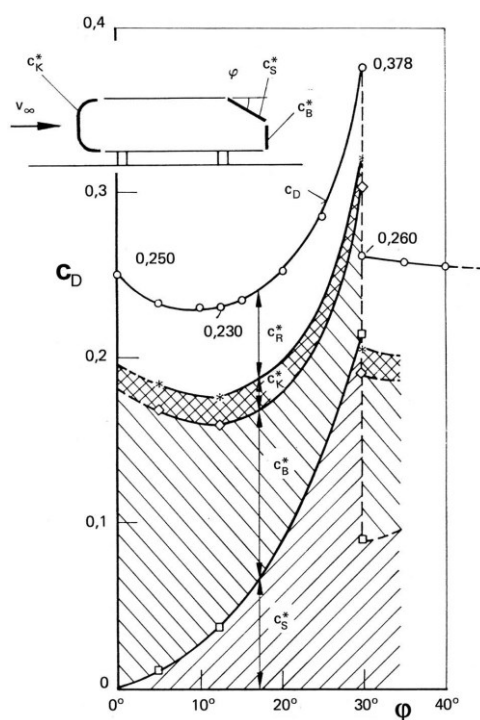
O formato simplificado de Ahmed possui um comprimento ( $L$ ) de 1044 mm, largura de 389 mm, altura de 288 mm, com uma variação do ângulo de inclinação de 0 a 40°, conforme ilustrado na Figura 22 (SCHUETZ, 2016). O estudo foi conduzido para um Número de Reynolds equivalente a 4,29 milhões, reproduzindo os coeficientes de arrasto exibidos na Figura 23 (AHMED et. al, 1984).

Figura 22 – Dimensões do Corpo de Ahmed



Fonte: Adaptado de SCHUETZ (2016).

Figura 23 – Coeficiente de arrasto aerodinâmico em função do ângulo de inclinação da traseira do corpo



Fonte: SCHUETZ (2016).

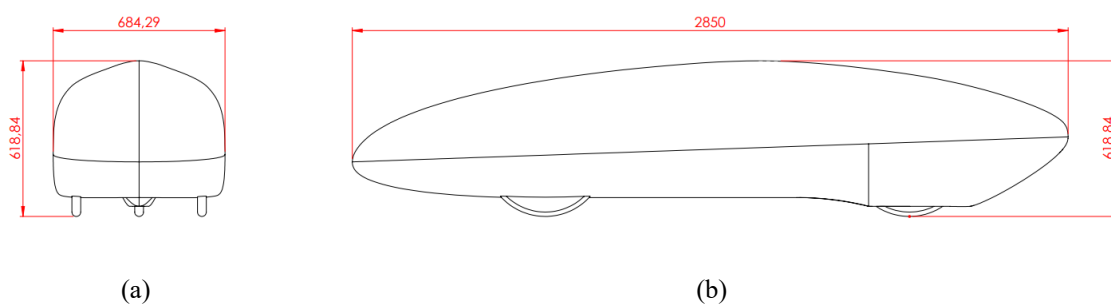
### 3.11 Protótipo Camelo II

O desenvolvimento de uma carenagem em fibra de carbono nas categorias de protótipo de eficiência energética representa um passo importante na busca da redução do consumo de gasolina, visto que é um material leve e ao mesmo tempo resistente, o que acaba por auxiliar na eficiência do veículo de forma expressiva. Em vista disso, a Drop Team desenvolveu o perfil chamado de Camelo II para ser construído em fibra de carbono.

Para atingir esse objetivo, as simulações fluidodinâmicas computacionais desempenham um papel fundamental nesta etapa, pois permitem analisar e aprimorar o perfil aerodinâmico da carenagem, identificando áreas de alta resistência ao fluxo de ar e projetando soluções que reduzem a resistência aerodinâmica. O desenvolvimento de um perfil aerodinâmico eficiente não apenas diminui o consumo de gasolina, mas também aumenta a estabilidade e segurança do veículo, demonstrando a importância da pesquisa e inovação nesse campo, assim como para um futuro mais sustentável e eficiente.

No que se refere às dimensões do modelo, o Camelo II possui comprimento de 2850 mm, largura de 684,29 mm e altura de 618,84 mm; além disso, tem uma área frontal equivalente a 0,35 m<sup>2</sup>. Essas características estão descritas nas Figura 24 (a) e (b) que representam as vistas frontal e lateral, respectivamente, e as cotas do modelo.

Figura 24 – Dimensões modelo Camelo II em (a) vista frontal e em (b) vista lateral

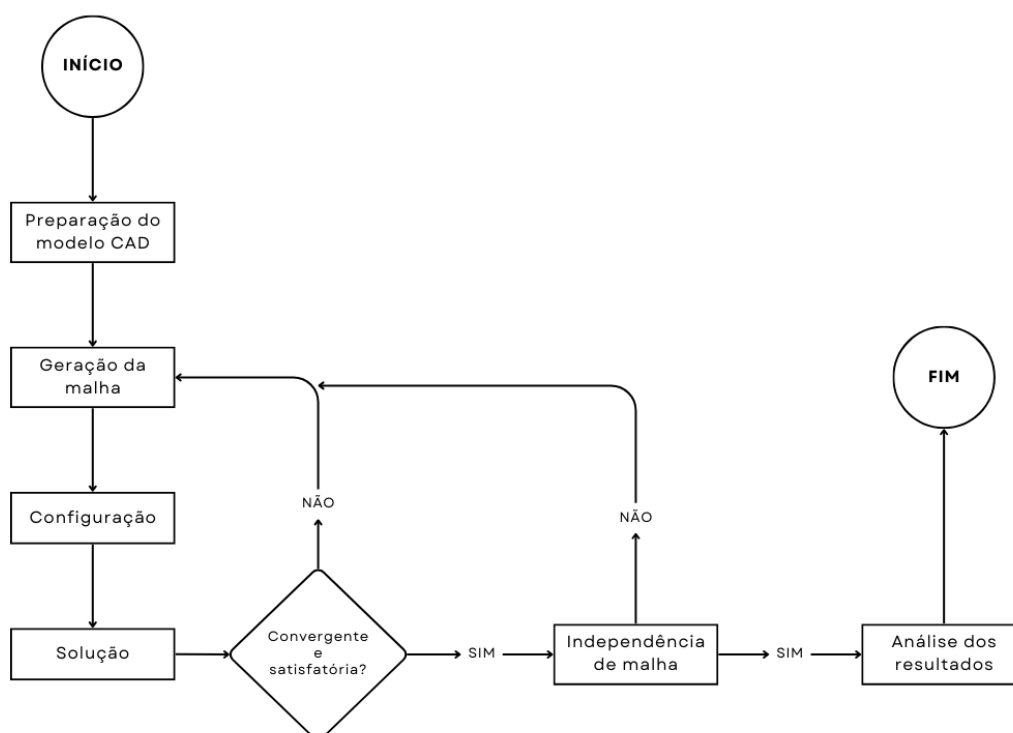


Fonte: O Autor (2023).

## 4 METODOLOGIA

A metodologia adotada na realização das simulações fluidodinâmicas computacionais do protótipo de eficiência energética, por meio do software Ansys, foi baseada em cinco etapas principais: modelo físico, malha, configuração, solução e análise dos resultados; conforme pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 – Fluxograma da metodologia aplicada ao presente trabalho



Fonte: O Autor (2023).

Como estratégia de validação das simulações fluidodinâmicas computacionais, utilizou-se os dados experimentais do Corpo de Ahmed com 25° de inclinação traseira como referência. Desenvolveu-se as etapas mencionadas com o objetivo de atingir um erro relativo máximo de 5% para o coeficiente de arrasto entre os valores experimentais e simulados.

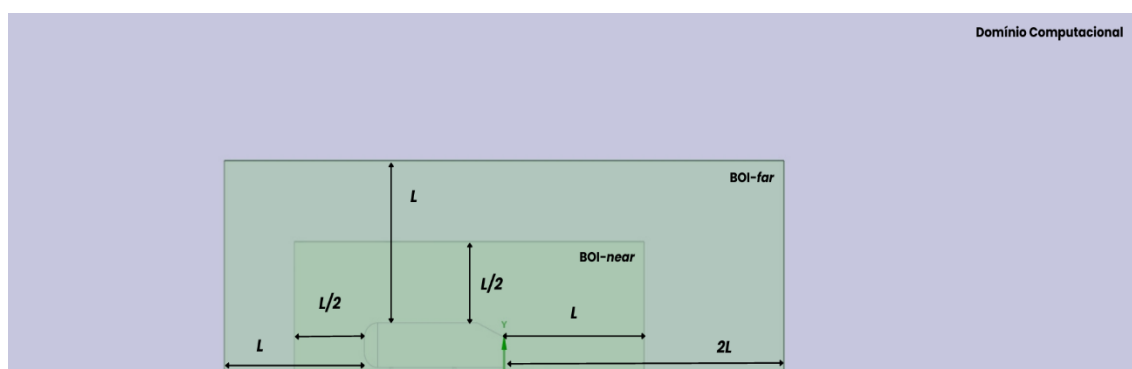
A primeira etapa foi a definição do modelo físico, o que inclui a geometria do protótipo e sua preparação, criação do volume de controle, definição e nomeação das zonas em que serão aplicadas as condições de contorno.

A partir do componente Geometry do *software* ANSYS Workbench, com a utilização do software de modelagem 3D SpaceClaim, preparou-se a geometria para as

simulações, simplificando o modelo de projeto auxiliado por computador (*Computer Aided Design – CAD*) e verificando a existência de possíveis erros no modelo como arestas inexatas. Após esse passo, criou-se o domínio computacional ( $D_C$ ) (Figura 19) referente às condições de escoamento a partir da função Enclosure, respeitando-se os tamanhos mínimos indicados.

Em seguida, criou-se dois corpos de influência (*Bodys Of Influence – BOIs*, um corpo mais próximo ao objeto (*BOI-near*) e outro um pouco mais distante (*BOI-far*), mas com dimensões menores que as do domínio computacional. Os corpos estão representados na Figura 26, assim como suas distâncias em relação ao objeto de estudo na Tabela 2. Ainda, nomeou-se as regiões do  $D_C$  (Figura 27) e realizou-se a extração do volume do sólido.

Figura 26 – Corpos de influência (BOIs)



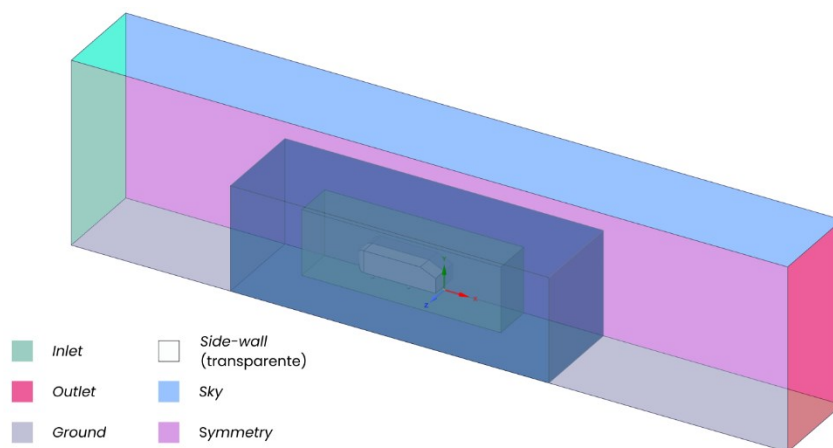
Fonte: O Autor (2023).

Tabela 2 – Distâncias do domínio computacional e dos corpos de influência em relação ao objeto de estudo

<b>Distância</b>	<b>Domínio Computacional</b>	<b>BOI-far</b>	<b>BOI-near</b>
Distância Frontal	3L	L	L/2
Distância Traseira	5L	2L	L
Distância Lateral	2L	L	L/2
Altura	3L	L	L/2

Fonte: O Autor (2023).

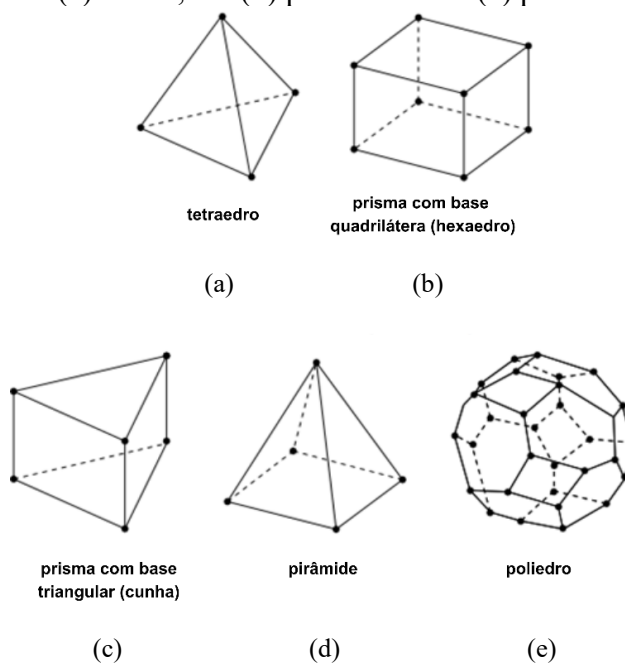
Figura 27 – Regiões do domínio computacional



Fonte: O Autor (2023).

A segunda etapa foi a geração da malha, realizada através *software* Fluent Meshing, contido no componente Fluent do ANSYS Workbench, o qual utiliza o método FVM. Esta etapa envolve a definição dos tamanhos mínimos e máximos das células, áreas de refinamento, camadas limite e o tipo de célula, além da geração das malhas superficial e volumétrica. Em relação aos tipos de células que podem ser utilizados, encontram-se variadas geometrias disponíveis. Contudo, a Figura 28 apresenta as possíveis geometrias a serem utilizadas para geração de malhas em CFD no *software* ANSYS.

Figura 28 – Possíveis geometrias das células de malha, (a) tetraedro, em (b) hexaedro, em (c) cunha, em (d) pirâmide e em (e) poliedro.



Fonte: Adaptado de ANSYS (2021a).

As malhas *poly-hexcore* contêm células poliédricas e *hexcore*, logo, as características da malha *poly-hexcore* contêm elementos de ambos os tipos de malhas. Pelos benefícios apresentados anteriormente, optou-se pela utilização da malha *poly-hexcore* em grande parte dos testes realizados. Entretanto, a malha tetraédrica também foi analisada.

Utilizou-se estratégias de refinamento de malha para áreas específicas do domínio computacional com o intuito de obter resultados mais precisos. O primeiro método a ser colocado em prática foi o dimensionamento das regiões dos corpos de influência (BOIs), definindo um tamanho mínimo de elemento. Nas regiões próximas ao sólido estão contidos gradientes de maior propriedade, o que necessita uma malha mais refinada. O segundo tipo de refinamento é realizado em regiões específicas que apresentam geometrias mais complexas e na superfície do próprio sólido, os quais necessitam uma malha ainda mais fina se comparada à malha dos corpos de influência, contabilizando com precisão as possíveis separações de fluxo e regiões de turbulência próximas ao objeto. A partir desses refinamentos, espera-se obter uma malha de alta qualidade capaz de prever o fluxo corretamente (ANSYS, 2021a).

Foram criadas três malhas para todos os casos simulados, denominadas malhas A, B e C, tendo a altura da primeira camada limite como principal parâmetro de referência no refinamento. Cada malha possui diferentes níveis de refinamento, sendo a C a mais detalhada e refinada, com uma maior densidade de células e nós. Essa abordagem de malhas múltiplas permite avaliar o impacto da resolução da malha nos resultados das simulações.

Uma qualidade mínima de célula foi satisfeita em todas as simulações, tendo como parâmetros de análise a qualidade ortogonal e a distorção, mantendo-se valores mínimos acima de 0,2 e abaixo 0,8, respectivamente. Assim, as soluções tendem a convergir mais facilmente, além de evitar resultados incoerentes, visto que apenas uma célula degenerada pode impactar negativamente as simulações.

Uma vez finalizada a configuração da malha, iniciou-se a etapa de configuração da solução numérica (*setup*). Neste ponto, parâmetros gerais, modelos de turbulência, propriedades dos materiais/substâncias e condições-limite (*boundary conditions*) foram definidas, assim como valores de referência a serem utilizados. Esta configuração é necessária para obtenção das distribuições de velocidade, pressão e outras variáveis de interesse dentro do domínio do problema.

Os parâmetros gerais se resumem à definição do solucionador, composição da velocidade e estado do tempo a serem utilizados para a solução numérica. Ainda, determina-se a aceleração gravitacional ( $g$ ) do caso a ser estudado. Este trabalho se ateve a utilizar estritamente o modelo de turbulência  $k-\omega$  SST.

Utilizou-se apenas material fluido durante a realização das simulações, visto que há uma extração do sólido do domínio computacional, no qual apenas a sua forma é avaliada. O fluido empregado foi o ar a uma temperatura de  $15^{\circ}\text{C}$  e 1 atm, de densidade  $1,225 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade  $1,7894\text{e-}05 \text{ kg/m.s}$  (ÇENGEL; CIMBALA, 2014). Uma vez que as condições de temperatura e pressão do ambiente não foram alteradas, temos as mesmas propriedades para todos os testes realizados.

As condições-limite são responsáveis pela determinação das características dos componentes presentes no domínio computacional que foram descritos na etapa inicial (geometria), isto é, as partes nomeadas. As características foram mantidas iguais para os variados testes realizados.

Tabela 3 – Configurações básicas dos principais grupos no estudo do protótipo

<b>Grupo</b>	<b>Tipo</b>	<b>Valores</b>	<b>Informações extras</b>
<i>Inlet</i>	Velocidade	6,994 e 11,11 (m/s)	Intensidade de turbulência: 1%
<i>Outlet</i>	Saída de pressão*	0 (Pa)	Intensidade de turbulência: 5%
<i>Ground</i>	Velocidade	6,994 e 11,11 (m/s)	-
<i>Side-wall e Sky</i>	Parede ( <i>wall</i> )	-	Cisalhamento especificado: 0
Objeto	Parede ( <i>wall</i> )	-	Não deslizamento

\*Pressão manométrica

Fonte: O Autor (2023).

O plano de simetria não é apresentado na tabela acima pois sua função é estipulada pelo próprio *software*. Uma vez que seu nome é definido como *Symmetry*, não é permitida a realização de alterações.

Os valores de referência são informações necessárias para a realização de cálculos numéricos, servindo de informação para as equações, que são utilizadas de acordo com os objetivos desejados. Segundo ANSYS (2021a), são utilizados apenas para pós-processamento em cálculos de quantidades físicas derivadas e coeficientes não dimensionais. Os valores de referência incluem a velocidade e densidade do fluido, área frontal e comprimento do corpo.

Na quarta etapa da metodologia, o método de solução foi configurado, em que as variáveis de estudo desejadas (relatórios) e os critérios de convergência são definidos, bem como o método de inicialização e os parâmetros de cálculo.

O método de solução utilizado foi o esquema *Coupled* em conjunto, preferivelmente, com o esquema de segunda ordem para pressão, momento e turbulência. Posteriormente, os relatórios foram aplicados de modo a se obter os valores de forças de arrasto e sustentação e seus respectivos coeficientes aerodinâmicos. Então, criou-se um monitor gráfico para avaliar o desenvolvimento dos valores em relação às iterações. Além disso, monitores residuais de continuidade, de componentes de velocidade (x, y e z), de energia cinética turbulenta (k) e de taxa de geração e dissipação de energia ( $\epsilon$  e  $\omega$ ) foram criados a fim de acompanhar o processo de cálculo. Os chamados resíduos são definidos como as diferenças no valor de uma quantidade entre duas iterações consecutivas e, podem atuar como critério de parada para a solução numérica. Objetivando uma maior precisão nos resultados, incrementou-se os valores de critérios dos monitores residuais de convergência para  $1 \times 10^{-5}$ , melhorando a convergência dos valores.

O tipo de inicialização utilizado foi a inicialização híbrida e o número de iterações foi padronizado para 2000 iterações. Vale lembrar que, uma vez satisfeitos os critérios de convergência, o número de iterações pode ser muito menor do que o estipulado, portanto, nota-se que as simulações CFD realizadas possuem duas possibilidades de critérios de parada: número de iterações ou correspondência dos critérios de convergência.

A quinta e última etapa foi a análise dos resultados, que envolveu a interpretação dos dados obtidos nas simulações e a comparação com resultados experimentais disponíveis na literatura. Foram analisadas as distribuições de velocidade, pressão, temperatura e outras grandezas físicas relevantes, assim como coeficientes aerodinâmicos, para avaliar a eficiência aerodinâmica do protótipo de eficiência energética do IFRS – *Campus Erechim*. Também foram realizadas análises de sensibilidade para avaliar a influência de diferentes parâmetros de entrada nos resultados.

Assim, identificou-se as regiões da carenagem que podem ser aprimoradas a fim de melhorar a eficiência aerodinâmica do protótipo.

## 5 RESULTADOS E DICUSSÕES

Os resultados obtidos através das simulações fluidodinâmicas computacionais realizadas no *software* Ansys 2023 R2 foram avaliados de forma quantitativa, tendo como foco principal o valor do coeficiente de arrasto, visto que este é o aspecto de maior influência no consumo de energia dentro da aerodinâmica veicular. De forma secundária, a fim informacional, o coeficiente de sustentação também foi analisado. Ainda, observou-se o comportamento do fluxo de ar em torno dos veículos a partir da visualização de projeções e gráficos do escoamento ao longo do tempo. Estes resultados foram comparados com dados experimentais disponíveis e com outros trabalhos de mesmo cunho.

Inicialmente, os estudos foram conduzidos de modo a estudar o Corpo de Ahmed com 25° inclinação traseira e validar a metodologia empregada nas simulações, analisando-se os valores encontrados e comparando-os com os valores experimentais disponíveis.

Na etapa de geração de malha, desenvolveu-se as três malhas mencionadas: A, B e C. A Tabela 4 apresenta uma síntese dos resultados obtidos para cada malha, exibindo parâmetros-chave para avaliação da qualidade como qualidade ortogonal (QO) e distorção (DS), e valores informativos como número de células e altura da primeira camada limite (yH) a fim de facilitar a análise comparativa e a identificação de tendências. Os parâmetros de qualidade de malha estão aceitáveis para os três casos, atendendo ao estipulado na etapa de metodologia. Além disso, obteve-se uma relação de bloqueio de 1,91%.

Tabela 4 – Parâmetro das malhas do Corpo de Ahmed

Malha	Células	QO Mínima	QO Média	DS máxima	DS média	yH (m)
A	1,63x10 <sup>5</sup>	0,25	0,94	0,75	0,056	0,00186
B	7,8x10 <sup>5</sup>	0,3	0,97	0,7	0,02	0,001
C	3,63x10 <sup>6</sup>	0,4	0,988	0,6	0,01	0,0005

Fonte: O Autor (2023).

Na Tabela 6, as malhas são relacionadas com os valores de coeficientes de arrasto encontrados através das simulações, o quais são comparados com o dado experimental obtido no estudo desenvolvido por Ahmed et al. (1984), equivalente a 0,298.

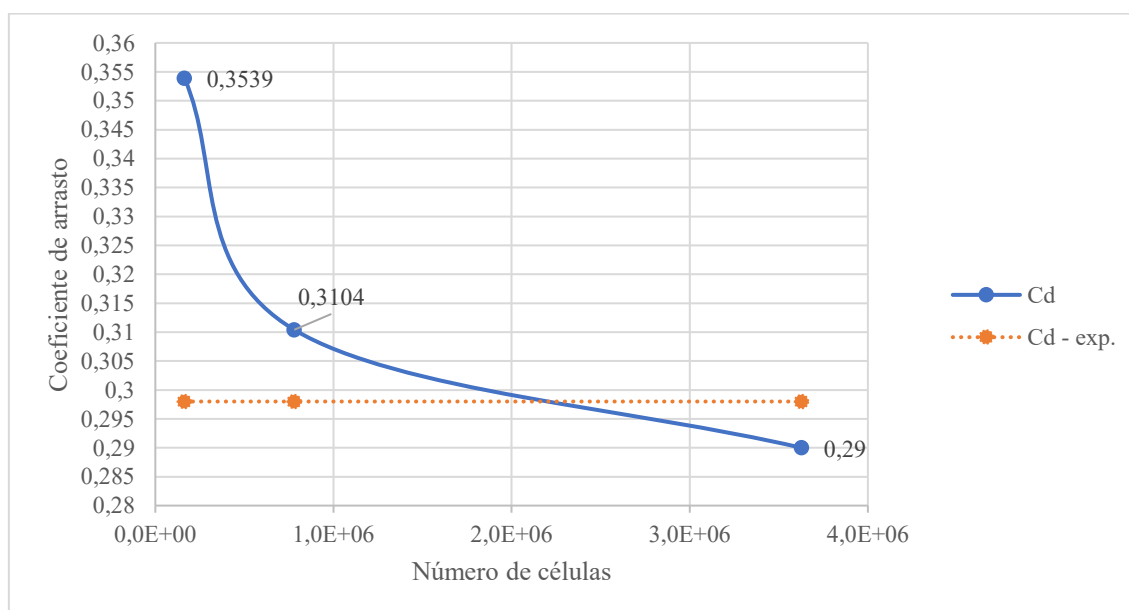
Tabela 5 – Malhas do Corpo de Ahmed x  $C_d$

Malha	$C_D$ – simulado	Erro (%)
A	0,3539	18,66
B	0,3104	4,16
C	0,29	2,68

Fonte: O Autor (2023).

Como pode-se observar na Tabela 5, a malha mais refinada (C) é a que mais se aproxima ao valor experimental quando comparada às outras malhas, representando uma diferença de 2,68% entre o simulado e o experimental. Essa diminuição do erro relativo entre as malhas se deve ao aumento do número de células, em que a diferença percentual entre o número de células das malhas A e B, B e C e A e C são 379%, 365% e 2127%, respectivamente. Portanto, pode-se dizer que o aumento no número de células, mantendo-se uma qualidade mínima, tende a gerar resultados mais precisos, o que é corroborado com o gráfico da Figura 29, em que o coeficiente de arrasto simulado é relacionado com o número de células das malhas.

Figura 29 – Coeficiente de arrasto x número de células - Corpo de Ahmed



Fonte: O Autor (2023).

Em diferentes estudos de mesmo cunho, conduzidos por Mika (2021) e Gutierrez et al. (2020), verifica-se que os valores de  $C_D$  apresentam o mesmo padrão, em que os dados mais precisos são obtidos por meio das malhas mais refinadas, que possuem um maior número de elementos, em comparação com as outras malhas criadas pelos autores. No entanto, observa-se que os valores apresentam variações cada vez menores à medida que a malhas atingem certo nível de refinamento. Gutierrez et al. (2020), ainda, demonstra que aumentando-se a malha em cerca de 61,4%, o  $C_D$  simulado varia em apenas 0,095%. Mendes (2011), por sua vez, observou que mesmo possuindo malhas com uma diferença de 1 milhão de nós, os resultados se diferenciaram em apenas 0,47%. Portanto, nota-se que o refinamento da malha é uma etapa crucial para a obtenção de resultados precisos, contudo, existe certo limite que se ultrapassado, não apresenta benefícios – a simulação passa a ser demasiadamente custosa e demorada. Sendo assim, durante a etapa de malha deve-se reconhecer se o refinamento da malha levará à resultados mais convergentes, levando-se em conta o esforço computacional e, principalmente o tempo necessário para realização das simulações.

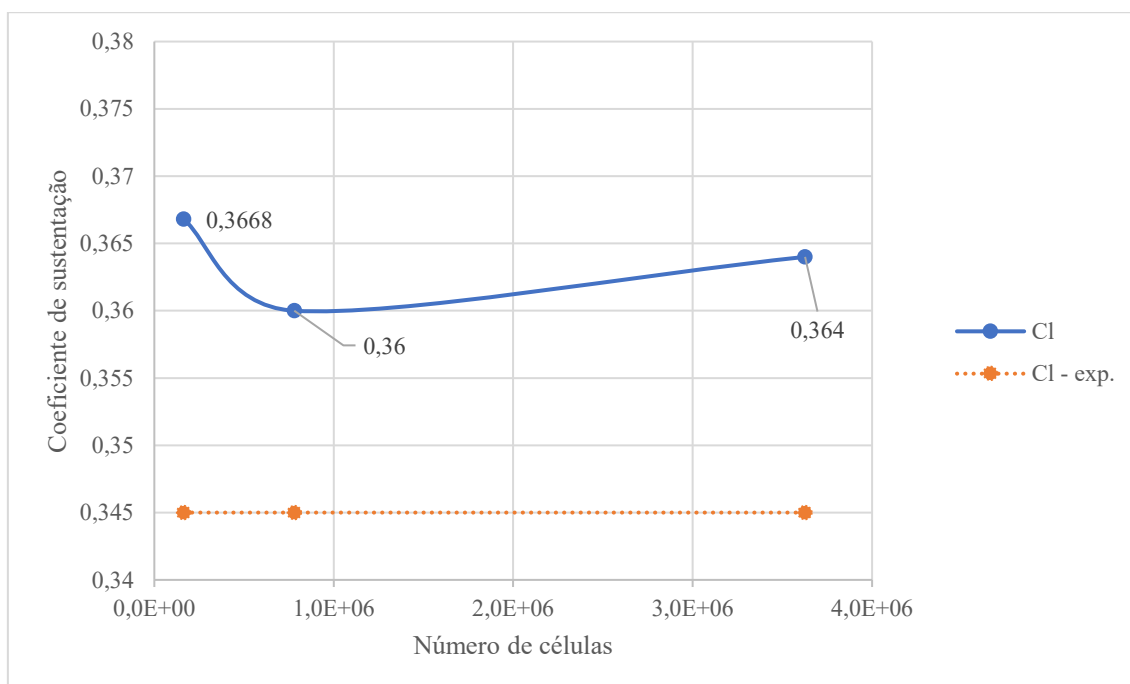
Diferentemente do comportamento do coeficiente de arrasto em relação ao refinamento das malhas, o coeficiente de sustentação não se aproxima gradualmente ao valor experimental, e a malha que possui o maior número de células não é aquela que gera resultados mais precisos (Figura 30). Na Tabela 6, observa-se os valores de  $C_L$  em de acordo com as malhas, em que há uma diferença de 5,51% em relação ao experimental ( $C_L=0,345$ ) na malha C (AHMED et al., 1984).

Tabela 6 – Malhas do Corpo de Ahmed x  $C_L$

<b>Malha</b>	<b><math>C_L</math> – simulado</b>	<b>Erro (%)</b>
<b>A</b>	0,3668	6,32%
<b>B</b>	0,36	4,35%
<b>C</b>	0,364	5,51%

Fonte: O Autor (2023).

Figura 30 – Coeficiente de sustentação x número de células - Corpo de Ahmed



Fonte: O Autor (2023).

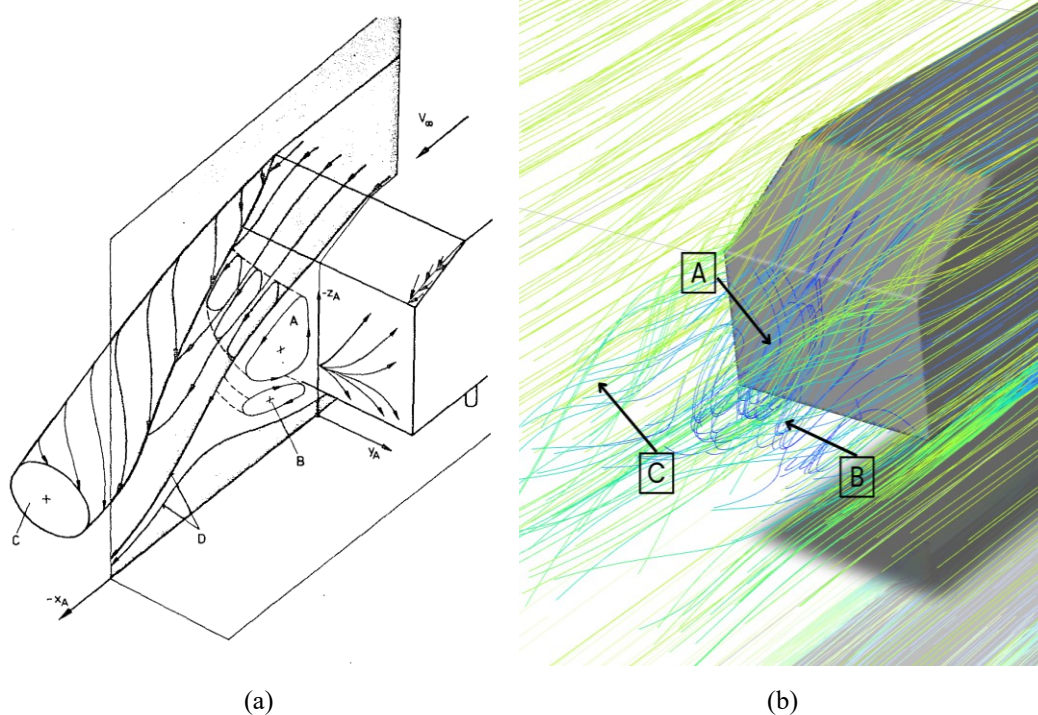
De acordo com Schuetz (2016), na generalidade, espera-se que o arrasto seja previsto com certa facilidade e precisão através das simulações CFD, enquanto a sustentação apresenta considerável variância, o que se deve em grande parte à complexidade das regiões turbulentas presentes nos escoamentos de aerodinâmica veicular. Este comportamento dos resultados de arrasto e sustentação também podem ser observados no estudo conduzido por Wäschle (2006), em que formatos de referência são analisados através de simulações computacionais fluidodinâmicas. Constatou-se que em regiões próximas ao solo, a topologia do fluxo não é totalmente precisa, do mesmo modo que há determinada diferença entre os escoamentos experimentais e simulados na porção superior dos veículos.

Como relatado, encontrou-se um valor de  $C_D$  simulado que difere em 2,68% em relação ao experimental no melhor dos cenários, que é a malha C. Este percentual representa uma boa precisão do resultado obtido, no entanto, quando se observa a relação entre as forças de pressão e as viscosas presentes no escoamento, obtém-se outra resposta positiva a este quesito. Conforme Ahmed et al. (1984) relataram, investigações experimentais indicaram que o arrasto de pressão constituía aproximadamente 85% do arrasto total do corpo de referência. Por meio das simulações, foram obtidos valores de 31,3 N e 5,61 N para as forças de pressão e viscosas, respectivamente. Ao calcular a

porcentagem em relação ao arrasto total, chegou-se à mesma conclusão de que 85% do arrasto total é atribuído ao arrasto de forma.

Partindo-se para a segunda etapa da validação das simulações CFD, buscou-se analisar características específicas presentes no escoamento dos testes experimentais realizados por Ahmed no corpo de referência, e compará-las com a representação do fluxo do ambiente de simulação. A Figura 31 (a) é uma representação de parte do desenvolvimento do fluxo de ar no experimento de Ahmed, observa-se que há duas zonas de recirculação de fluxo (A e B), um vórtice em forma de esteira (C) e uma bolha de separação (D). Esses mesmos fenômenos são visualizados e indicados nas Figuras 31 (b) e 32, obtidas através das simulações.

Figura 31 – Características do fluxo de ar do Corpo de Ahmed em (a) experimental e em (b) simulação



Fonte: Ahmed et al. (1984); O Autor (2023).

Figura 32 – Características do fluxo de ar do Corpo de Ahmed (simulação)



Fonte: O Autor (2023).

Acerca do fluxo quanto ao seu desenvolvimento por um objeto rombudo (corpo não aerodinâmico), observa-se um ponto de estagnação frontal seguido de uma aceleração do escoamento, que faz com o que o escoamento contorne o objeto, estabelecendo certa condição de recuperação de pressão normalizada na porção média, com posterior aumento de pressão na parte traseira. Esta descrição contempla o que é evidenciado em testes experimentais.

Analisando-se tanto de forma quantitativa quanto qualitativa, é possível afirmar que as simulações CFD apresentaram resultados precisos e coerentes em relação ao experimental, satisfazendo as condições propostas, e que o processo de configuração das simulações é válido e replicável para o caso do protótipo. A seguir, os resultados do estudo desenvolvido sobre o protótipo Camelo II são explicitados.

Na Tabela 7 são exibidos os parâmetros-chave das malhas A, B e C do modelo Camelo II, em que as configurações de malhas foram idênticas para os estudos em velocidades de 25 km/h e 40 km/h, devida a relativa pequena diferença entre as velocidades. Em todos os casos, as malhas apresentaram níveis de qualidade aceitáveis em relação aos parâmetros de qualidade ortogonal e distorção, e B equivalente a 0,83%.

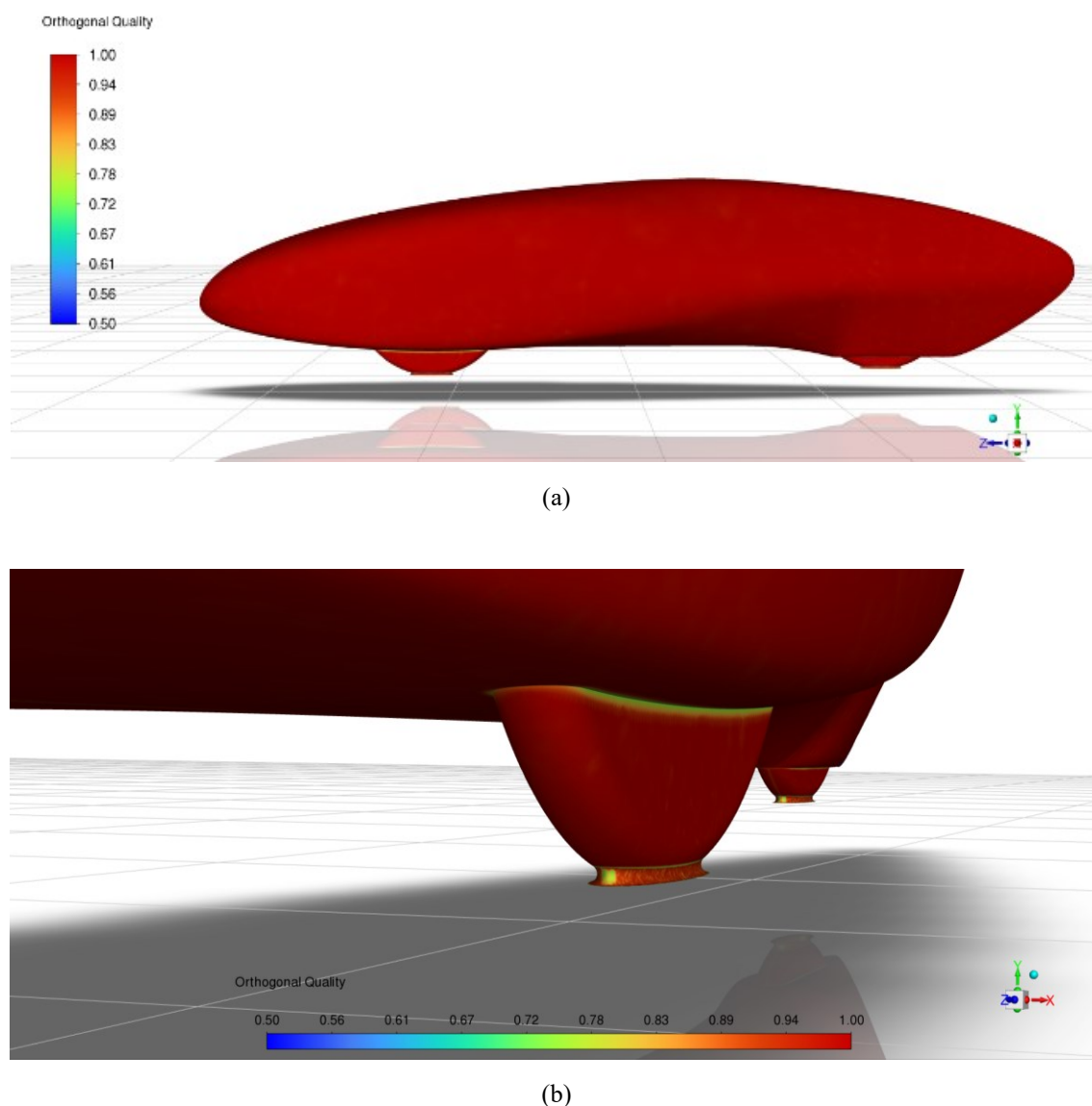
Tabela 7 – Parâmetros das malhas do modelo Camelo II

Malha	Células	QO Mínima	QO Média	DS máxima	DS média	yH (m)
A	1,66x10 <sup>6</sup>	0,3	0,971	0,7	0,029	0,008
B	2,78x10 <sup>6</sup>	0,3	0,984	0,7	0,016	0,003
C	7,45x10 <sup>6</sup>	0,5	0,985	0,63	0,014	0,0003

Fonte: O Autor (2023).

Além de as condições mínimas serem satisfeitas, os valores médios de QO e de DS estão notavelmente distantes das referências mínimas, o que demonstra que a maioria das células possui um padrão de qualidade excelente. Na Figura 33 (a) são exibidos os diferentes níveis de qualidade ortogonal da malha superficial do protótipo, em que as áreas de menor qualidade são as regiões consideradas mais complexas, com dimensões relativamente pequenas e transições acentuadas, como é o caso das rodas, Figura 33 (b).

Figura 33 – Qualidade ortogonal malha C do protótipo Camelo II, em (a) vista lateral e em (b) ampliação da região das rodas



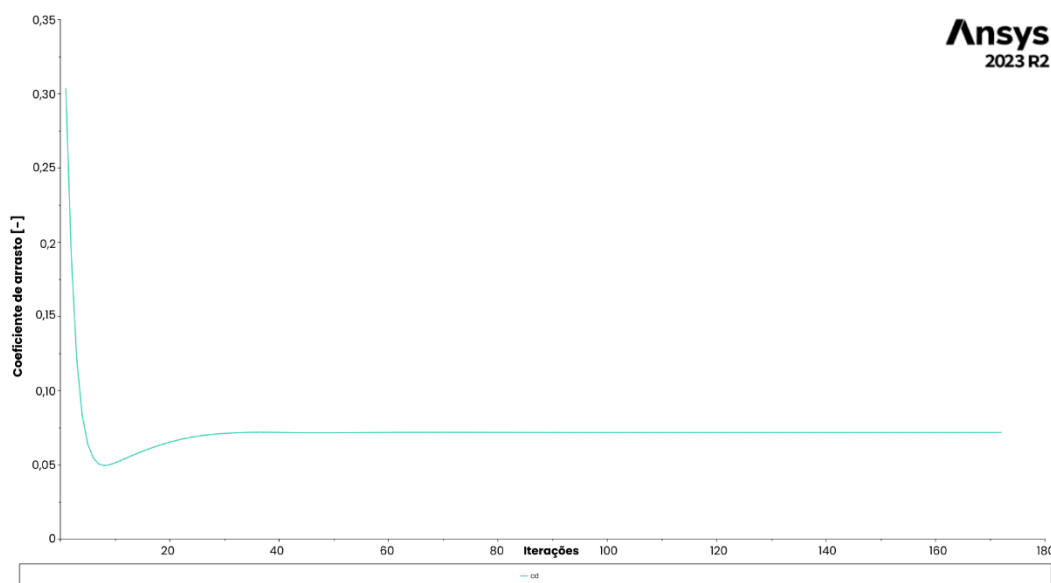
Fonte: O Autor (2023).

Observou-se que o modelo Camelo II necessitou um nível de refinamento superior se comparado ao corpo de Ahmed para atingir uma qualidade de célula aceitável, o que

se deve em grande parte à maior complexidade da geometria do protótipo. Além disso, uma vez que o Camelo possui um comprimento maior, o domínio computacional também é maior, o que gera um aumento do número de células. Comparando as malhas C das Tabelas 4 e 7, o corpo de referência possui cerca de  $3,63 \times 10^6$  células, enquanto o Camelo II possui cerca de  $7,45 \times 10^6$ , o que representa uma variação de 51,3%.

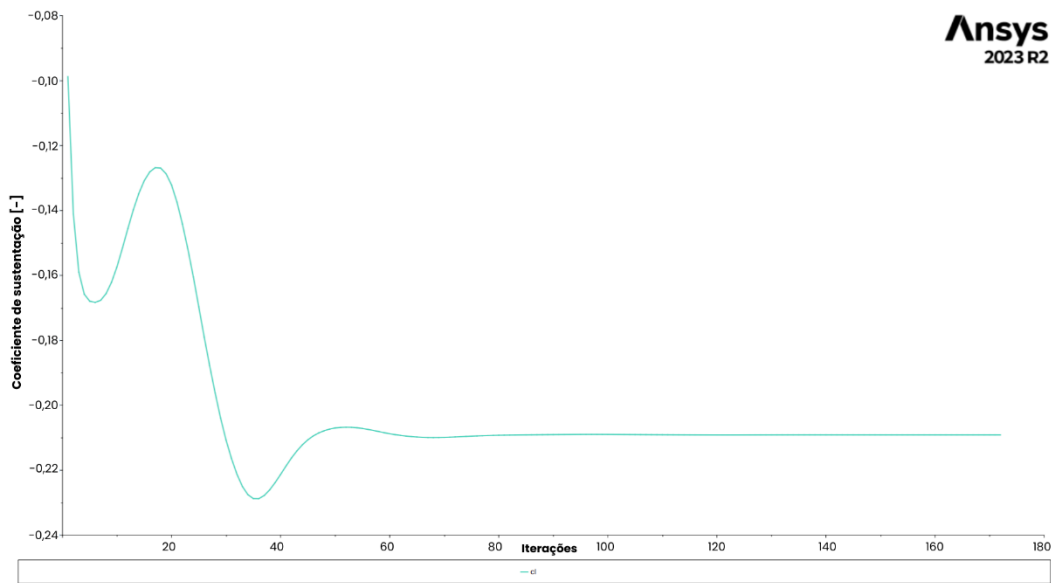
No que se refere a convergência dos resultados, todas as simulações atingiram um estado convergente, independentemente do critério de parada. Na maioria dos casos, a convergência foi atingida a partir dos valores residuais, no entanto, durante as simulações realizadas com as malhas C do protótipo Camelo II foi optado pelo encerramento dos cálculos antes da convergência direta das iterações ou dos residuais. Devido ao elevado número de elementos e da complexidade dos escoamentos, o processo de cálculo das iterações demanda um maior esforço computacional, em que o tempo de cálculo de cada iteração aumenta significativamente. Levou-se mais de 48 horas do início das simulações até a decisão de parada para os casos estudados das malhas C do protótipo, em um momento em que os valores de  $C_D$  e  $C_L$  se mostraram estabilizados durante um longo período, como exibido nas Figuras 34 e 35.

Figura 34 – Coeficiente de arrasto x iterações



Fonte: O Autor (2023).

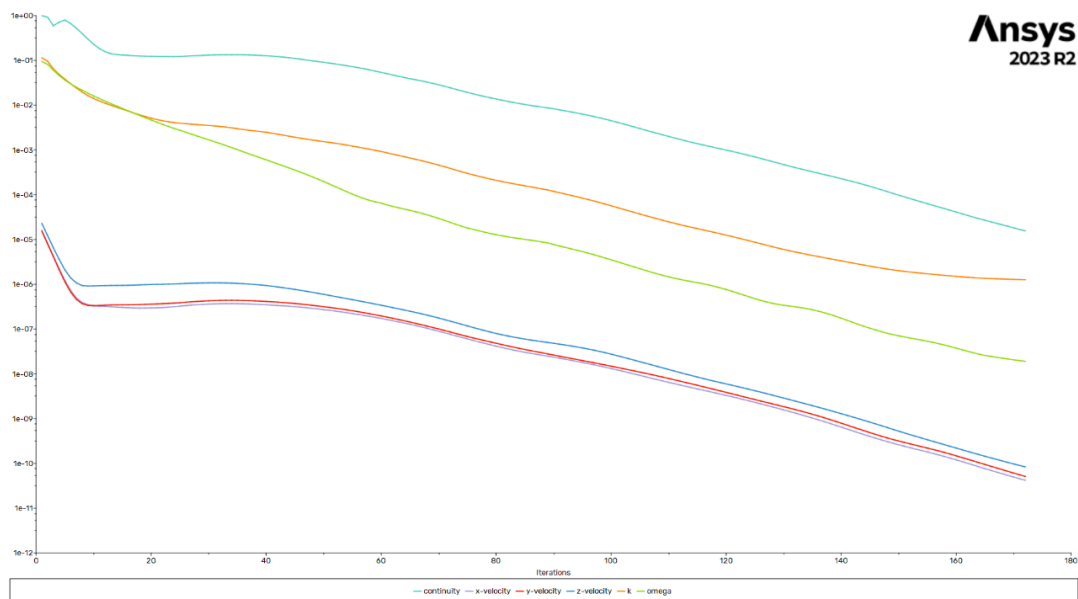
Figura 35 – Coeficiente de sustentação x iterações



Fonte: O Autor (2023).

A Figura 36 ilustra o momento da parada das simulações, exibindo os gráficos residuais em relação ao número de iterações ao longo do tempo. Observa-se que os gráficos apresentam um comportamento decrescente e gradual, sem grandes variações, e apesar da continuidade não atingir a casa de  $1 \times 10^{-5}$ , pode-se prever que em determinado momento este valor irá convergir. Desta forma, os resultados obtidos através destas simulações podem ser considerados válidos.

Figura 36 – Residuais x iterações



Fonte: O Autor (2023).

A Tabela 08 exibe os valores de  $C_D$  e  $C_L$  do modelo Camelo II para as velocidades de 25 km/h e 40 km/h, relacionando-os com as malhas A, B e C.

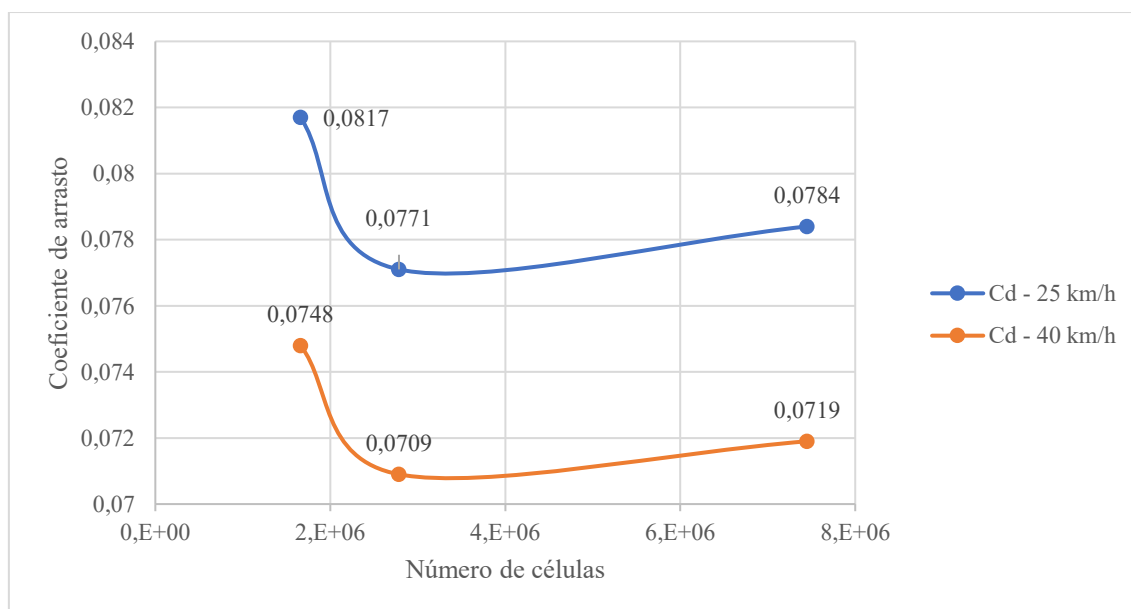
Tabela 8 – Malhas do modelo Camelo II x  $C_D$  x  $C_L$

Malha	25 km/h		40 km/h	
	$C_D$	$C_L$	$C_D$	$C_L$
A	0,0817	-0,135	0,0748	-0,146
B	0,0771	-0,177	0,0709	-0,183
C	0,0784	-0,226	0,0719	-0,209

Fonte: O Autor (2023).

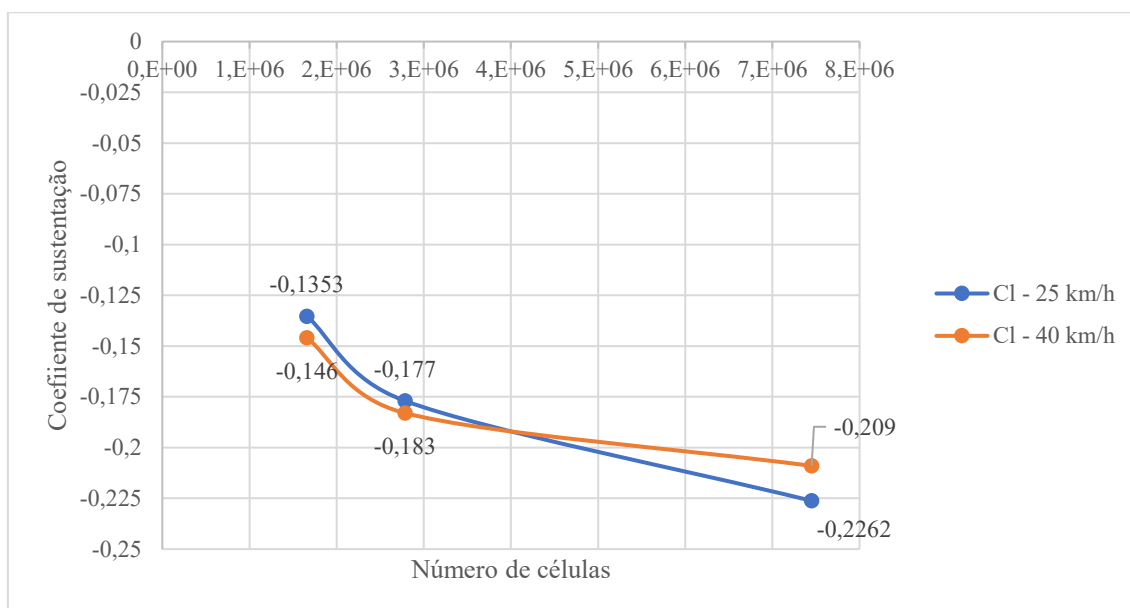
Os dois casos estudados apresentam comportamentos semelhantes, em que os coeficientes de arrasto e sustentação variam de acordo com a malha praticamente na mesma proporção, o que fica evidente quando as curvas de  $C_D$  e  $C_L$  são plotadas em gráficos (Figura 37 e 38). Nota-se que  $C_D$  apresenta uma variação entre diminuição e aumento do valor de acordo com a malha, enquanto  $C_L$  apenas diminui.

Figura 37 – Coeficiente de arrasto x número de células - protótipo Camelo II



Fonte: O Autor (2023).

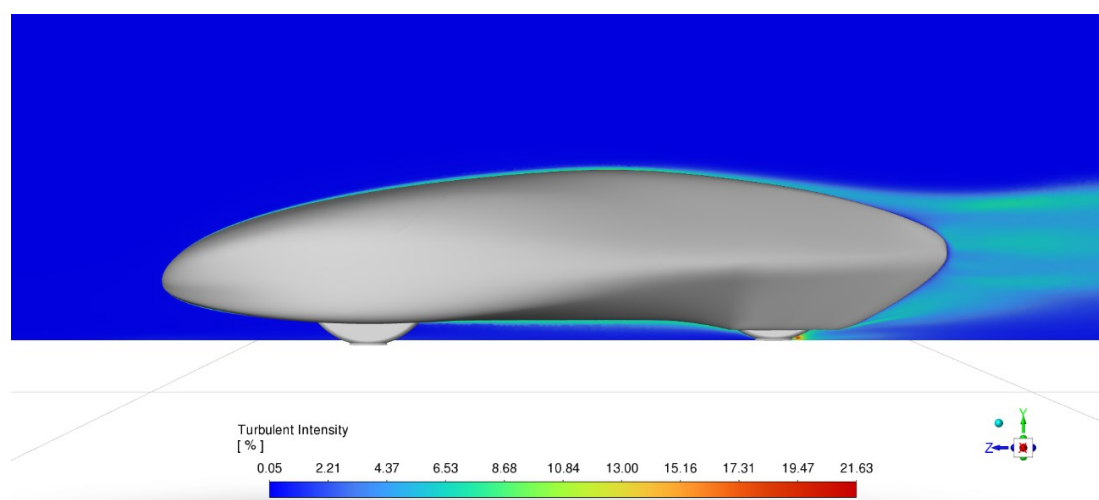
Figura 38 – Coeficiente de sustentação x número de células - protótipo Camelo II



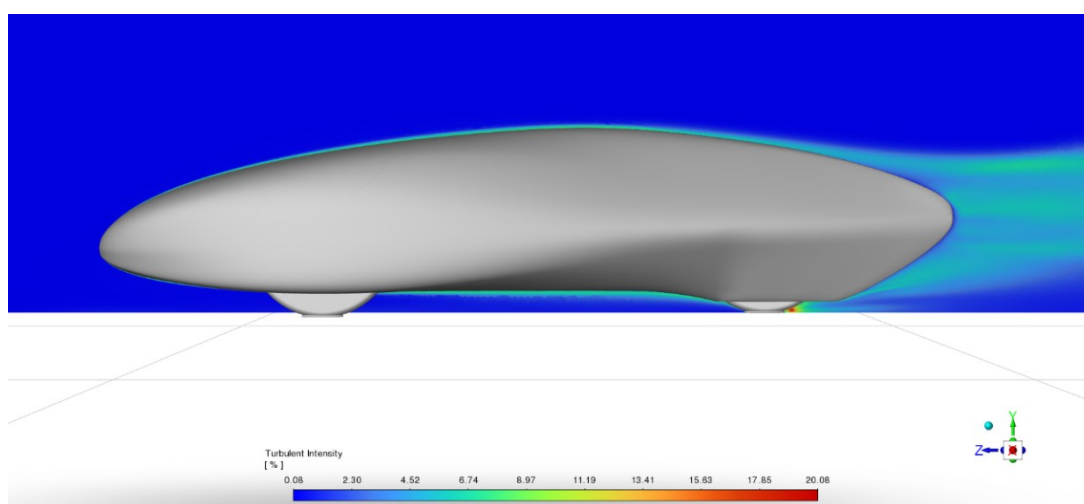
Fonte: O Autor (2023).

Com base na Tabela 08 e na Figura 37, nota-se que os coeficientes de arrasto mais baixos estão associados ao cenário em que a velocidade do escoamento é mais elevada. Isso é, de certa forma, intrigante, uma vez que o fluxo a 40 km/h exerce forças de magnitudes maiores sobre a carenagem do protótipo em comparação ao fluxo a 25 km/h. No entanto, uma vez que a força de sustentação negativa é maior para o primeiro caso, indica-se que esta condição tem origem no comportamento do fluxo. Ao analisar os resultados numéricos, nota-se que o escoamento mais lento exibe variações de pressão mais pronunciadas em toda a extensão da carenagem, incluindo as rodas. Esse comportamento pode ser atribuído a diversos fatores, como o desenvolvimento de uma camada limite mais espessa devido à dificuldade de estabilização do fluxo, que carece de energia cinética suficiente para permanecer aderido à superfície do protótipo devido à sua baixa velocidade. Outro aspecto a considerar é a maior propensão à transição entre comportamentos laminar e turbulento em escoamentos lentos, evidenciada pelo aumento do número de Reynolds de  $1,35 \times 10^6$  para  $2,17 \times 10^6$ . Além disso, observa-se que a intensidade de turbulência é mais elevada no caso de 25 km/h, conforme ilustrado na Figura 39.

Figura 39 – Intensidade de turbulência, em (a) 25 km/h e em (b) 40 km/h



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2023).

No corpo de referência de Ahmed, avaliado a uma velocidade de 60 m/s, a prevalência de forças de pressão é evidente, enquanto veículos de baixa velocidade experimentam efeitos mais significativos de forças viscosas. A predominância de forças viscosas em escoamentos de baixa velocidade está associada à influência da viscosidade do fluido, que representa a resistência do fluido ao escoamento. Em situações em que um veículo se desloca a baixas velocidades, as camadas de ar próximas à sua superfície têm uma dificuldade maior para aderir à superfície devido a relativa baixa energia cinética do fluxo. Esse fenômeno resulta na formação de camadas limite mais espessas, as quais contribuem para uma distribuição de velocidades mais complexa, caracterizada por uma transição gradual de velocidade entre a camada limite e as camadas de fluido adjacentes.

A variação suave de velocidade amplifica a relevância das forças viscosas em comparação com escoamentos de alta velocidade.

Ao analisar os relatórios de forças do modelo Camelo II, obtidos por meio das simulações, observou-se a predominância das forças viscosas devido ao escoamento de baixa velocidade, representando aproximadamente 73,79% e 74,37% das forças totais para os casos de 25 km/h e 40 km/h, respectivamente. Esta constatação está alinhada com um estudo anterior sobre outro protótipo de eficiência energética conduzido a uma velocidade de 7 m/s (25,2 km/h) por Sapio (2016). Nesse estudo, foi concluído que o arrasto do modelo Model 3 era composto por 25,85% de efeitos de pressão e 74,15% de efeitos viscosos.

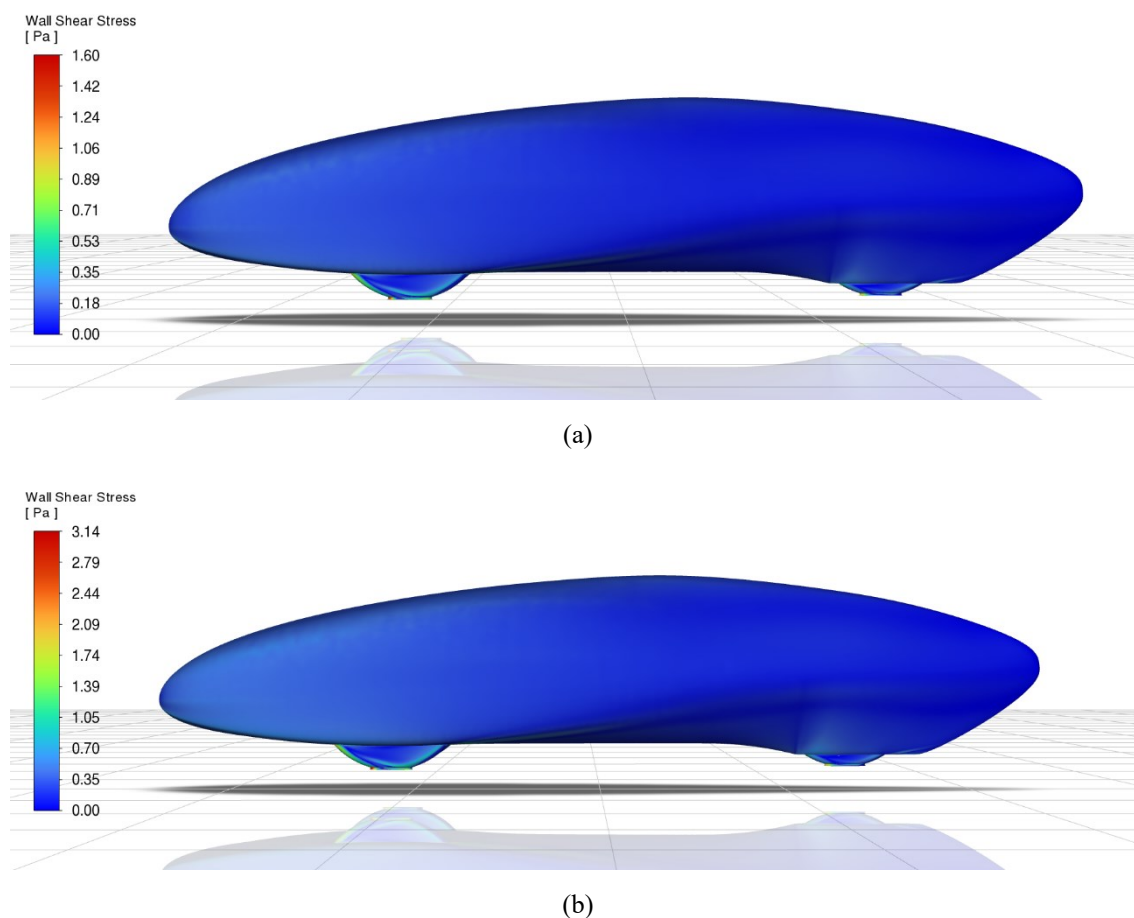
Tabela 9 – Distribuição de forças de diferentes veículos

Veículo	Pressão		Viscosa	
	Força [N]	%	Força [N]	%
Ahmed 25° (AHMED et al., 1984)	31,3	84,8	5,61	15,2
Camelo II (25 km/h)	0,1018	26,2	0,2868	73,8
Camelo II (40 km/h)	0,2339	25,6	0,6787	74,4
Model 3 (SAPIO, 2016)	0,165	24,8	0,5	75,2

Fonte: O Autor (2023).

A tensão de cisalhamento na superfície, do inglês *wall shear stress*, em veículos está relacionada ao atrito entre o ar e a superfície do veículo em movimento. Em veículos de baixa velocidade, a interação entre o fluido e a superfície é caracterizada por uma menor velocidade relativa, o que resulta em menores tensões de cisalhamento. Em contraste, veículos com altas velocidades apresentam maiores velocidades relativas entre o fluido e a superfície, resultando em um gradiente de velocidade mais pronunciado e, conseqüentemente, em uma maior tensão de cisalhamento. De acordo com as Figuras 40 (a) e (b), é observado que as áreas com as tensões de cisalhamento mais elevadas correspondem às regiões onde ocorrem as maiores velocidades do escoamento. Adicionalmente, verifica-se que o cenário de 40 km/h apresenta valores de magnitudes superiores em comparação com o fluxo de 25 km/h.

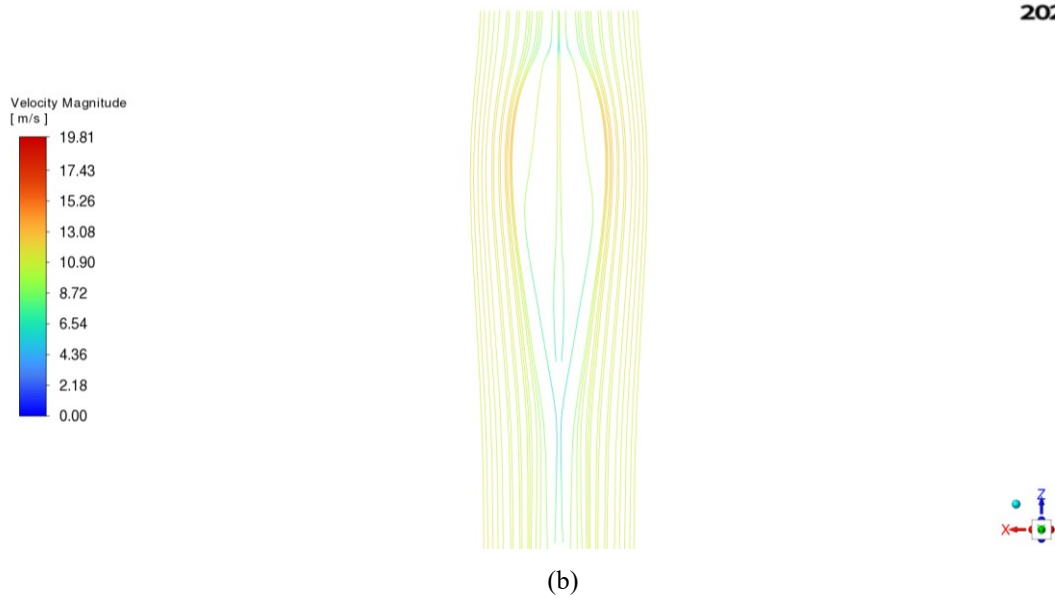
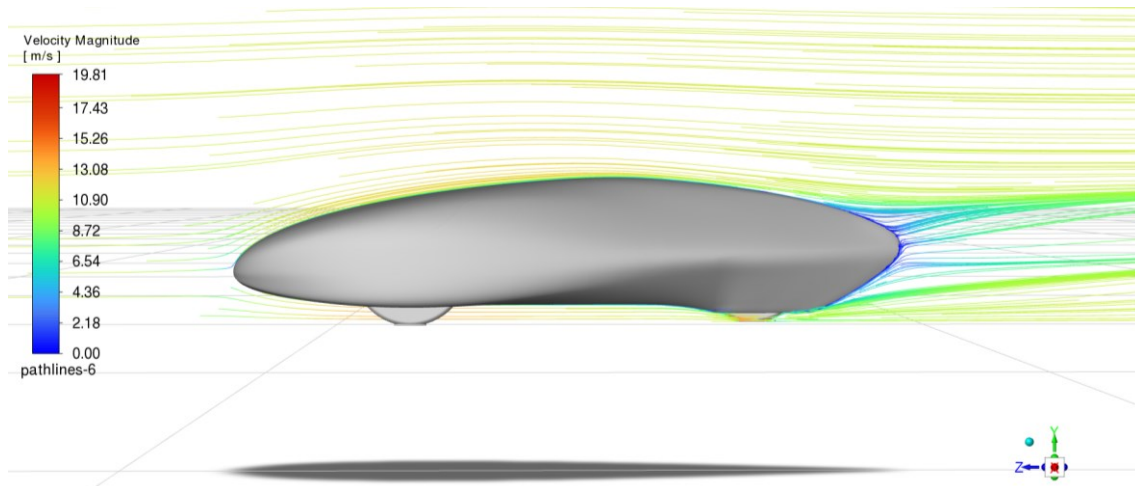
Figura 40 – Tensão de cisalhamento na superfície do protótipo em (a) 25 km/h e em (b) 40 km/h



Fonte: O Autor (2023).

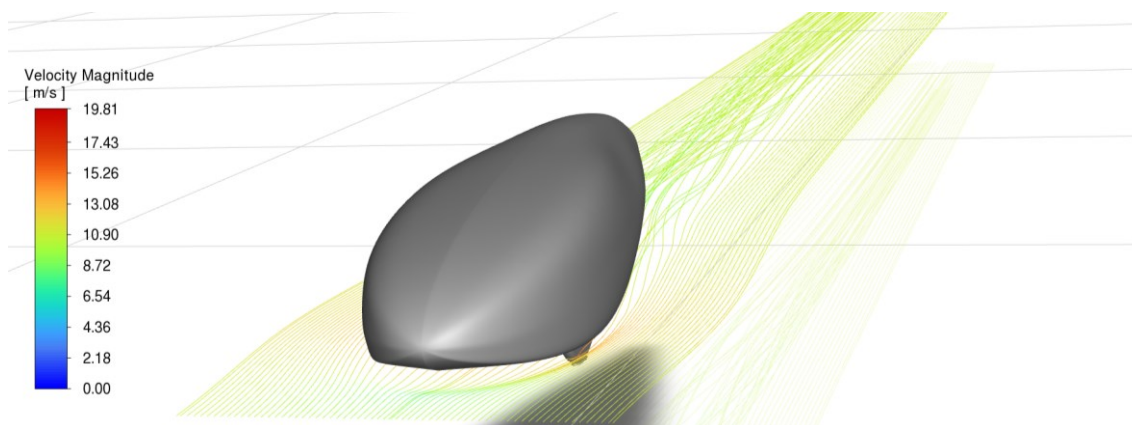
A respeito do desenvolvimento do escoamento e das linhas de ar que escoam sobre o protótipo Camelo II, verifica-se uma boa adesão do fluxo à superfície da carenagem, em que o ar contorna o veículo sem grandes deflexões, com volume de ar deslocado relativamente pequeno, o que minimiza a formação de turbulências e vórtices, reduz a resistência ao movimento e permitindo que o protótipo se locomova com certa facilidade em meio fluido. Essas características são fundamentais para garantir eficiência e estabilidade durante o deslocamento, contribuindo para uma performance otimizada em termos de resistência aerodinâmica e economia de energia. As Figura 41 e 42 ilustram as trajetórias das camadas de ar para o escoamento de 40 km/h, exibindo o comportamento do fluxo em diferentes pontos.

Figura 41 – Trajetórias das camadas de ar (40 km/h), em (a) vista lateral do plano de simetria e em (b) vista superior de um plano xz

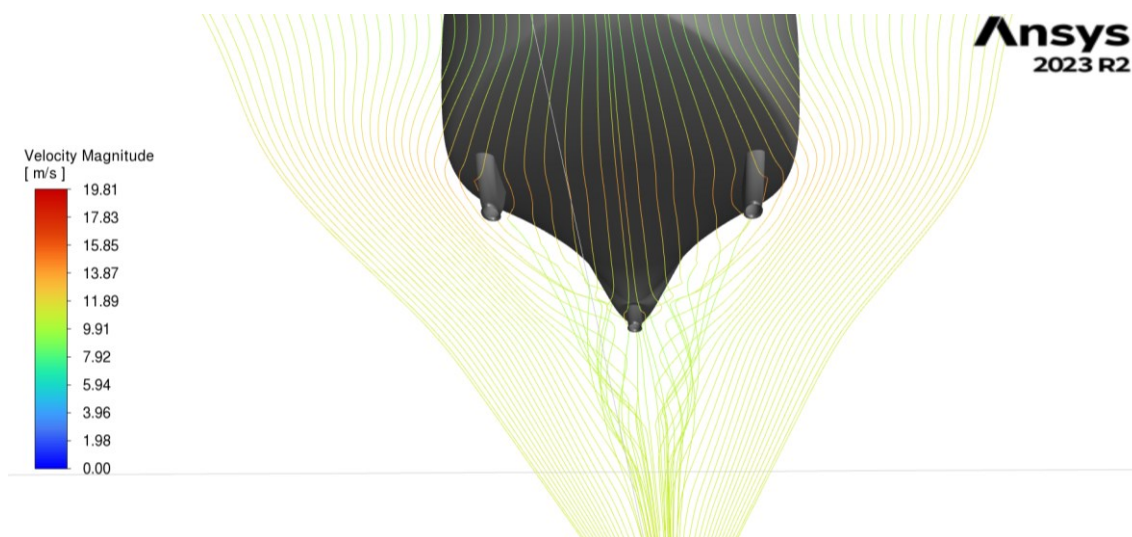


Fonte: O Autor (2023).

Figura 42 – Trajetórias das camadas de ar (40 km/h), em (a) e (b) interação entre o fluido e as rodas



(a)

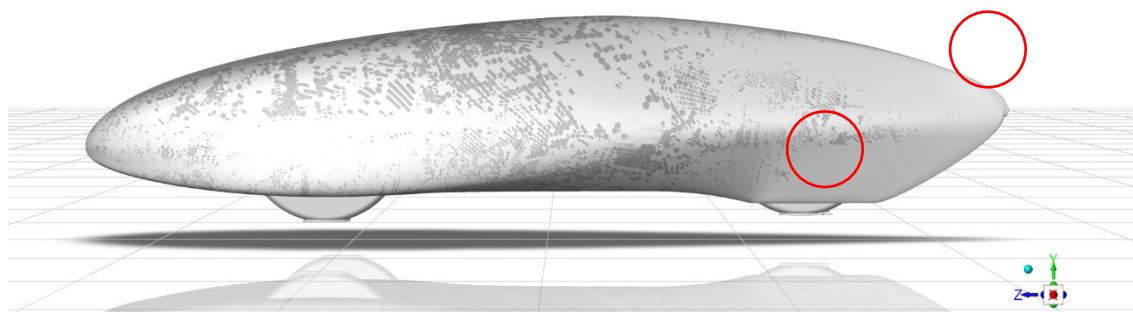


(b)

Fonte: O Autor (2023).

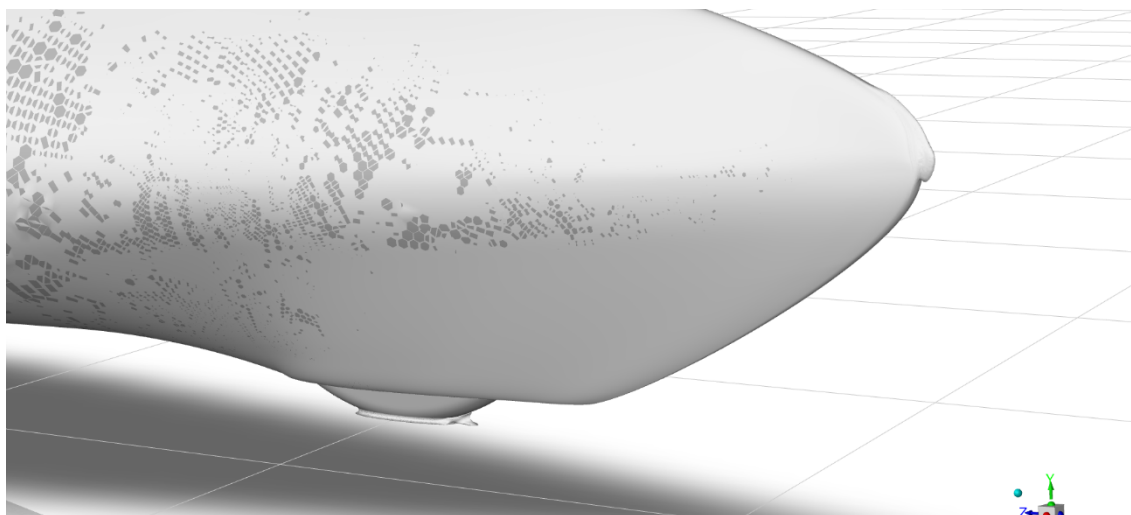
No entanto, alguns resultados numéricos obtidos através das simulações indicaram a existência de forças contrárias ao deslocamento de ar, caracterizando a ocorrência do fenômeno de recirculação de fluxo. Buscando-se visualizar as regiões de separação, condição necessária para a recirculação, criou-se uma isosuperfície de velocidade negativa na direção de z aplicada ao protótipo, possibilitando a visualização das regiões de separação de fluxo, as quais foram identificadas em pequenas proporções nas partes posteriores das rodas e na traseira do protótipo, regiões de altas turbulências.

Figura 43 – Isosuperfície de velocidade no eixo z



Fonte: O Autor (2023).

Figura 44 – Separação de fluxo na parte traseira do protótipo

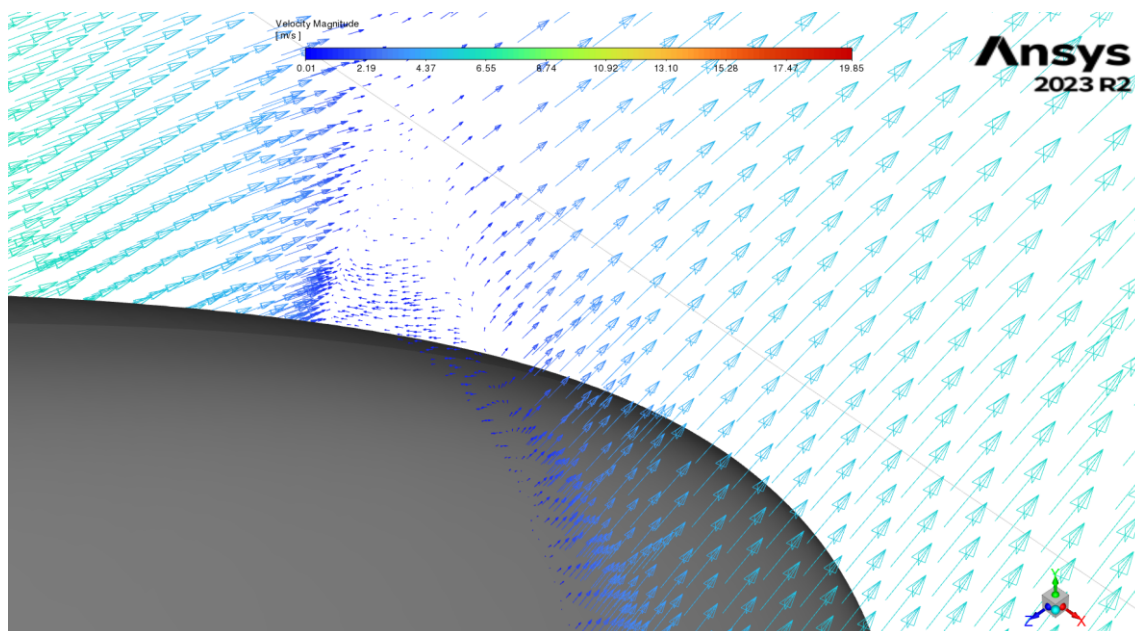


Fonte: O Autor (2023).

De forma similar à isosuperfície, criou-se um plano de referência em  $z=-1330$  mm e aplicou-se a representação através de vetores, os quais indicam as intensidades, direções e sentidos em termos de velocidade, possibilitando a visualização do efeito de recirculação de fluxo. Analisando-se a região, constatou-se a existência de recirculação do escoamento próxima a superfície do protótipo, com relativa baixa velocidade. Na Figura 45, observa-se pequenos vetores de sentido contrário ao escoamento. Este comportamento é prejudicial à eficiência energética, uma vez que gera um certo nível de resistência e, por se tratar de um fenômeno intrínseco ao escoamento de objetos em meio fluido, não é possível eliminá-lo completamente. Contudo, existem maneiras eficazes de reduzir sua influência, uma delas é através do afastamento da separação em relação à superfície do protótipo na direção de  $z$  e no sentido negativo; ocorrendo o mais distante

possível, esta condição tende a melhorar o desempenho aerodinâmico, reduzindo-se a turbulência.

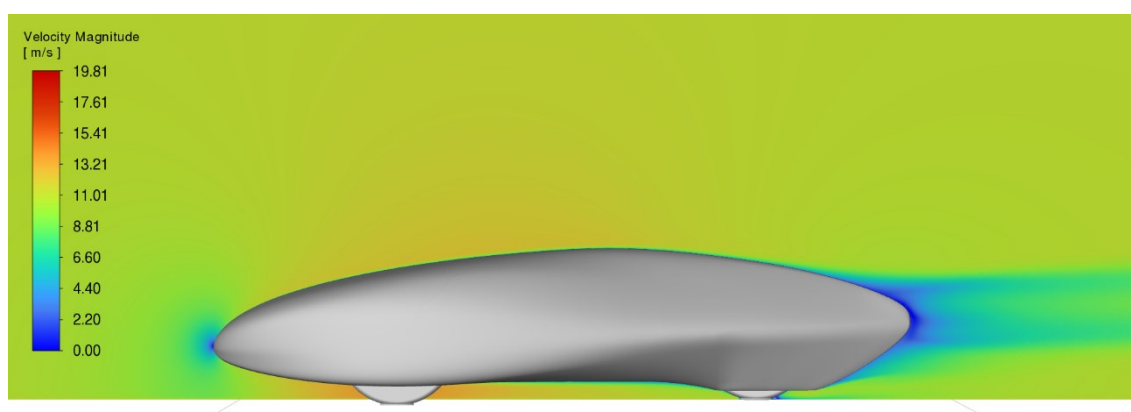
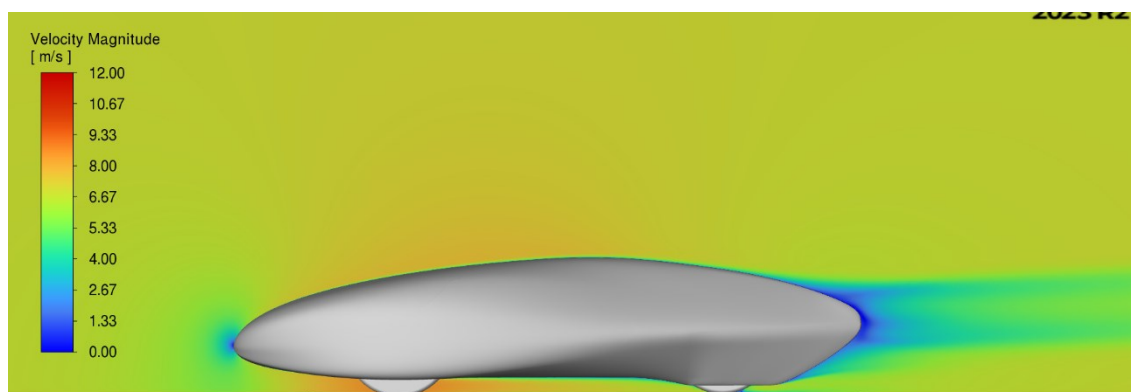
Figura 45 – Vetores de velocidade no plano  $z=-1330$  mm (40 km/h)



Fonte: O Autor (2023).

Tendo-se como referência o plano de simetria da Figura 39 (a), observa-se que após o contato frontal entre o fluxo e o veículo, o escoamento é defletido para as partes superior e inferior do protótipo, sendo forçado a contornar a carenagem. Neste instante, o ar é acelerando em ambas as direções e apresenta maiores magnitudes na superfície inferior devido à restrição do escoamento por conta da proximidade do veículo em relação ao solo, distância que é cerca de 190 mm. Desta forma, a diferença de velocidade entre as regiões acaba por gerar *downforce*. Além disso, a partir das Figuras 46 (a) e (b), nota-se que a região inferior na parte traseira exibe característica de difusor, em que o escoamento inferior é direcionado para cima, ao encontro do fluxo superior e com a tendência de se aproximar a velocidade do ar livre, assim, contribuindo para evitar a geração de uma grande zona de separação de fluxo e para a redução de arrasto.

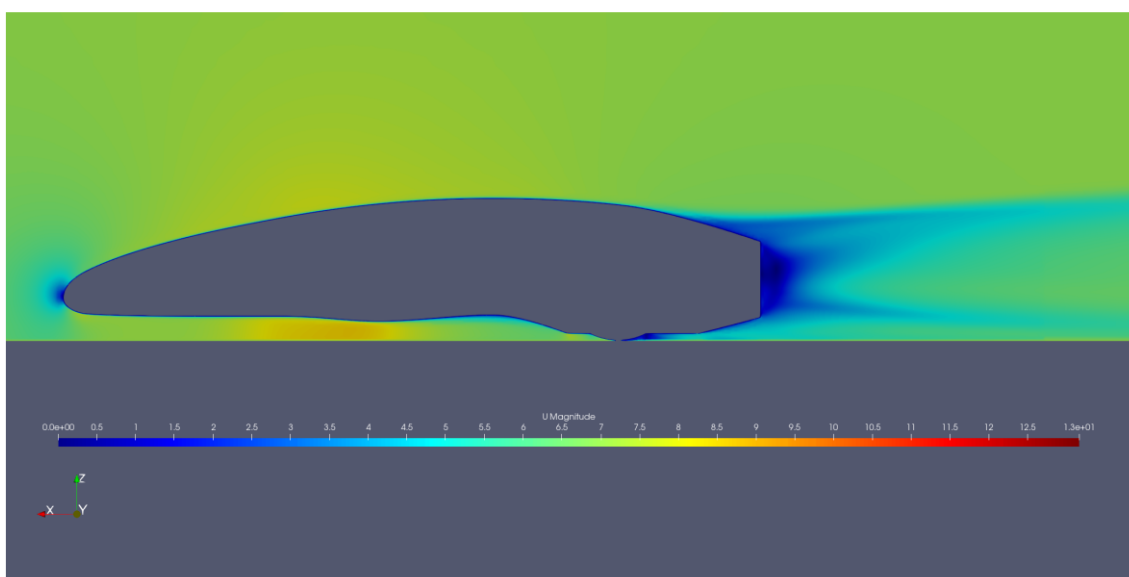
Figura 46 – Perfil de velocidade no plano de simetria, em (a) 25 km/h e em (b) 40 km/h



Fonte: O Autor (2023).

Em comparação com o modelo Aero@UBI03 desenvolvido por Rodrigues (2021) para as competições SEM, verifica-se que a zona de recuperação de pressão na superfície superior do Camelo II é relativamente maior, e que a aceleração do fluxo na parte inferior é um tanto precoce, o que se deve à uma transição mais tênue entre o bico e traseira e pela menor planicidade da superfície inferior. Ademais, os escoamentos nas porções posteriores dos veículos apresentam consideráveis diferenças, em que o protótipo português apresenta uma região de separação de fluxo maior em virtude de sua forma, a qual possui uma interrupção abrupta, conforme a Figura 47.

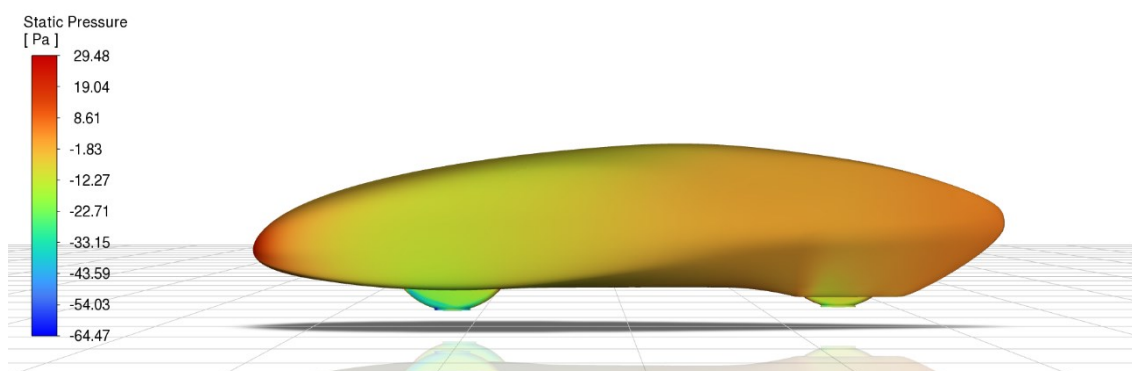
Figura 47– Velocidade no plano de simetria do protótipo Aero@UBI03



Fonte: Rodrigues (2021).

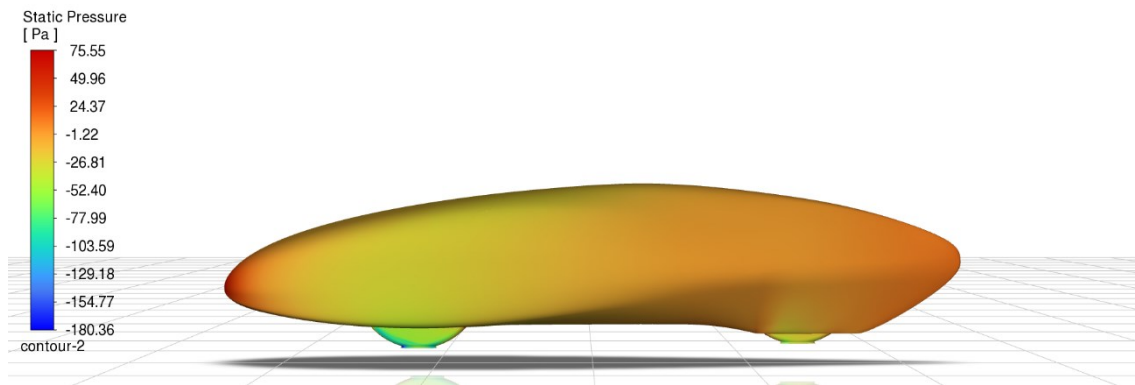
Nas Figuras 48, 49 e 50, regiões de alta pressão são identificadas nas partes dianteira e traseira do protótipo Camelo II, resultantes dos respectivos pontos de estagnação. A porção média exibe características notáveis de recuperação de pressão, manifestando certa estabilidade, enquanto as regiões das rodas exibem zonas tanto de alta quanto de baixa pressão devido a interação entre a rotação dos pneus e o fluxo de ar.

Figura 48 – Pressão estática na superfície do protótipo – vista lateral, 25 km/h



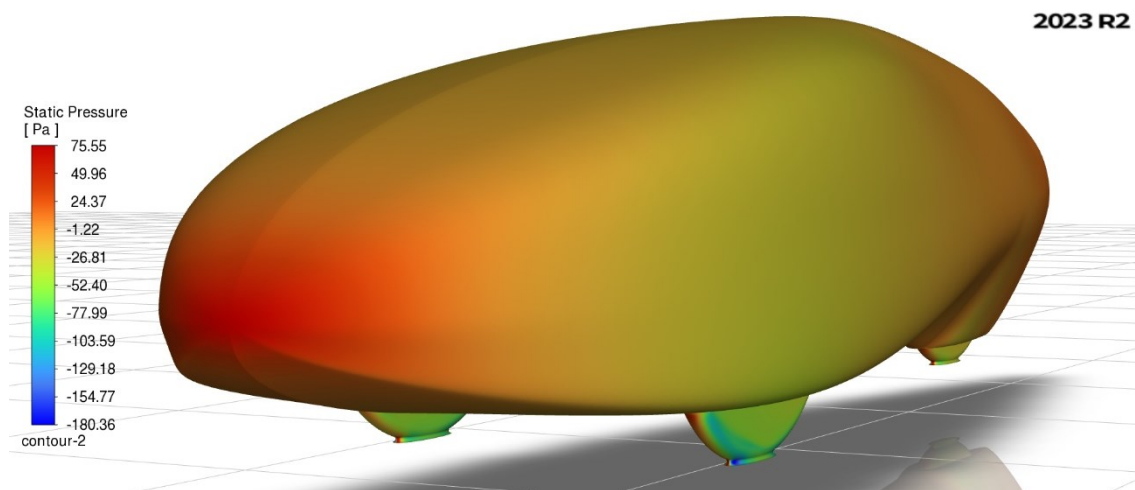
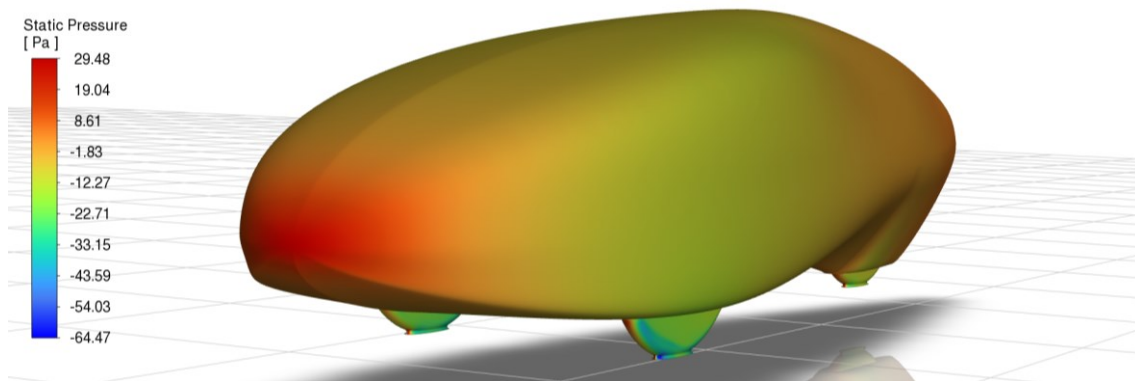
Fonte: O Autor (2023).

Figura 49 – Pressão estática na superfície do protótipo – vista lateral, 40 km/h



Fonte: O Autor (2023).

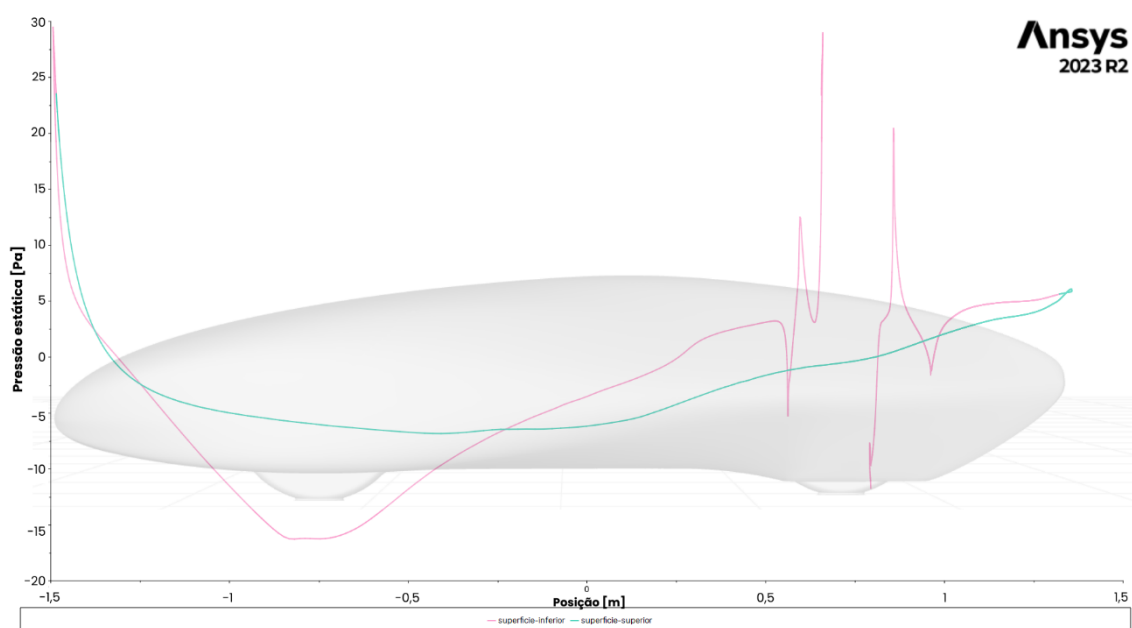
Figura 50 – Pressão estática na superfície do protótipo – vista frontal/lateral, em (a) 25 km/h e em (b) 40 km/h



Fonte: O Autor (2023).

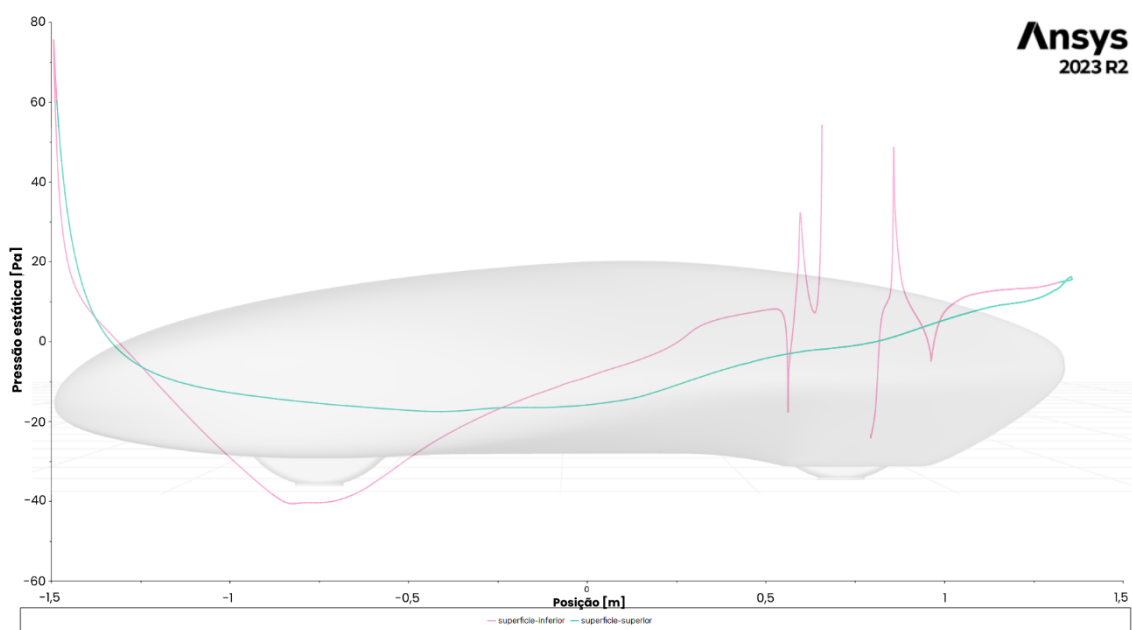
Em relação ao desenvolvimento da pressão ao longo das superfícies superior e inferior do protótipo, observa-se sua distribuição no eixo z a partir das Figuras 51 e 52. Nota-se picos de pressão em pontos de primeiro contato com o ar, como o bico e a roda traseira, no entanto, observa-se que não há expressiva variações de pressão ao longo das diferentes áreas avaliadas, até mesmo entre as partes frontal e traseira, sugerindo uma solidez no desempenho aerodinâmico do protótipo. Além disso, a superfície inferior apresenta maior instabilidade devido à interação com as rodas e o solo.

Figura 51 – Distribuição da pressão estática no plano de simetria ao longo de z, 25 km/h



Fonte: O Autor (2023).

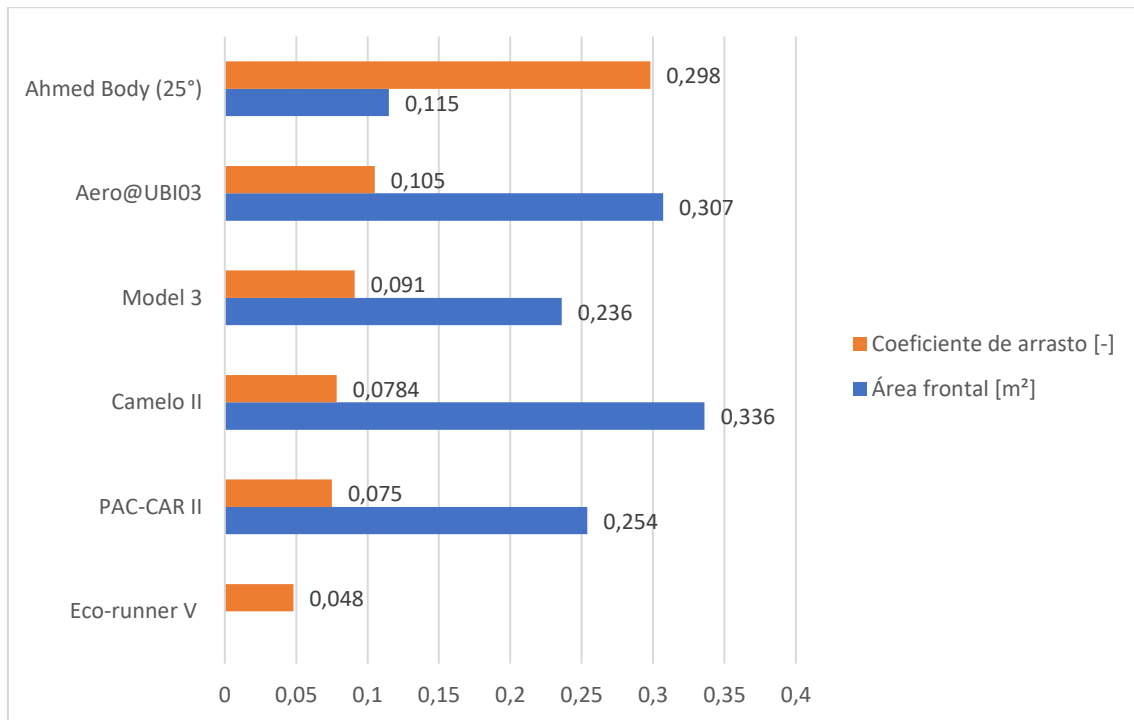
Figura 52 – Distribuição da pressão estática no plano de simetria ao longo de z, 40 km/h



Partindo-se de uma análise numérica, estritamente quantitativa e considerando os dados obtidos através das malhas C, verifica-se que os coeficientes de arrasto estão dentro de uma faixa desejável no que diz respeito a veículos ultraeficientes. Comparando-se os valores de  $C_D$  de projetos que participam da SEM como o PAC-CAR II (Swiss Federal Institute of Technology), campeão global da competição em edições passadas e referência no desenvolvimento de protótipos de eficiência energética, observa-se a proximidade do modelo Camelo II, com uma diferença de 4,5%. Adicionalmente, observa-se que, mesmo com uma área frontal relativamente ampla em comparação a outros protótipos de eficiência energética, o desempenho aerodinâmico do protótipo Camelo II é notável, o que é atribuído ao desenvolvimento eficiente do fluxo ao longo da carenagem, caracterizado por uma aderência eficaz, transição suave e pequenas áreas de separação e recirculação de fluxo.

Na Figura 53, são exibidos coeficientes de arrasto de diferentes formatos e suas respectivas áreas frontais; com destaque para o Eco-runner VI, reconhecido em 2016 como o veículo de menor arrasto (SHANKARA, 2018); no entanto, não há dados disponíveis quanto sua área frontal.

Figura 53 – Coeficiente de arrasto de diferentes veículos



Fonte: O Autor (2023).

## 6 CONCLUSÃO

O estudo aerodinâmico proposto neste trabalho pôde ser realizado de forma satisfatória por meio das simulações fluidodinâmicas computacionais, avaliando-se as características aerodinâmicas da nova carenagem proposta para o protótipo, sem a necessidade de realização de testes experimentais previamente. Assume-se que as simulações entregam resultados semelhantes aos observados nos testes práticos, sem demandar material, espaço físico e mão de obra para tal, são ferramentas úteis para otimizar recursos utilizados no projeto.

No que diz respeito aos objetivos específicos deste estudo, a preparação do modelo CAD desempenhou papel crucial na geometria, eliminando potenciais erros na geração de malhas e proporcionando simulações mais confiáveis. A criação da malha de elementos seguiu as diretrizes do manual fornecido pelo desenvolvedor do *software*, empregando elementos poliédricos que não apenas apresentam uma otimização do tempo de cálculo nas simulações, mas também resultaram em dados precisos. A avaliação da qualidade da malha, utilizando a combinação de qualidade ortogonal e parâmetro de distorção das células, demonstrou ser confiável, evidenciando uma tendência consistente em relação à precisão, associada à qualidade da malha. Da mesma forma, a configuração do cálculo das variáveis  $C_D$  e  $C_L$  seguiu as recomendações do desenvolvedor, utilizando o sistema de cálculo  $k-\omega$  SST, o qual mostrou ser altamente aplicável para o estudo aerodinâmico veicular.

A validação do modelo de simulação, por meio do estudo realizado sobre o corpo de referência de Ahmed, revelou-se uma etapa crucial para orientação das simulações, permitindo a verificação da influência dos parâmetros de cálculo nas variáveis desejadas, em que revelou boas práticas a serem seguidas para obtenção de resultados precisos, proporcionando, assim, uma base replicável para o caso de estudo da carenagem do protótipo Camelo II. Posteriormente, os padrões de malhas e parâmetros de cálculo estabelecidos não apenas simplificaram a condução de diversas simulações, mas também viabilizaram a comparação sistemática entre elas. Essa abordagem sistemática possibilitou uma análise abrangente das variações nos resultados em relação às malhas e níveis de refinamento.

As simulações realizadas para 25 km/h e 40 km/h buscaram analisar as condições encontradas em pista durante as competições SEM, permitindo a obtenção de dados relevantes para a otimização do veículo em condições práticas. A análise comparativa

entre os escoamentos de diferentes velocidades destacou as variações no comportamento aerodinâmico do protótipo, no entanto, observou-se pouca diferença.

Os escoamentos com angulação de 15 e 30° em relação ao protótipo não foram avaliados devido à complexidade do estudo e ao tempo restrito. Desta forma, ressalta-se a necessidade de abordagens mais aprimoradas, estratégias de pesquisa mais eficientes e o desenvolvimento de métodos simplificados, mas representativos, para abordar especificamente as condições de ventos laterais. A compreensão completa do comportamento aerodinâmico sob diferentes ângulos é relevante, especialmente em aplicações práticas em que as condições ambientais podem variar consideravelmente.

De maneira geral, este trabalho permitiu a visualização de pontos de melhora da nova carenagem do protótipo, como, por exemplo, nas regiões de recirculação de fluxo próximas à superfície do protótipo. Ainda, a partir da avaliação qualitativa e quantitativa de suas características aerodinâmicas, aspectos que permitem um parecer mais acurado do pesquisador, observou-se que a nova carenagem proposta para o protótipo se mostra bastante promissora, especialmente quando comparada a outros veículos ultraeficientes.

Visto que as simulações CFD são ferramentas úteis no processo de concepção de veículos, permitem projetar veículos com menor consumo de combustível, contribuindo para o alcance de médias de consumo superiores, sendo este o objetivo final do protótipo em questão. A contribuição deste estudo transcende a simples realização das simulações, estendendo-se ao aprimoramento do projeto, em que as conclusões obtidas a partir da análise detalhada das simulações fornecem informações valiosas para refinamentos no *design* atual, promovendo, assim, avanços no sentido de eficiência energética do protótipo. Dessa forma, este trabalho não apenas atendeu às metas estipuladas, mas também se consolidou como um elemento de otimização e aprimoramento contínuo do projeto em busca de soluções mais eficazes e sustentáveis.

## **7 TRABALHOS FUTUROS**

No contexto de continuidade do aprimoramento da aerodinâmica do protótipo, a etapa subsequente contempla a realização de alterações na carenagem seguidas de novas simulações computacionais fluidodinâmicas visando a avaliação das mudanças, a fim de atingir níveis superiores de eficiência aerodinâmica. Além disso, recomenda-se a análise dos ventos laterais para uma maior compreensão da interação entre a carenagem do protótipo e o ar.

Como segunda fase deste estudo, propõe-se a realização de testes experimentais como medições de pressão estática em diferentes pontos da carenagem. Esta abordagem visa viabilizar uma análise comparativa entre os resultados obtidos por meio das simulações fluidodinâmicas computacionais, com o intuito de validar ou refutar as conclusões deste trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ANSYS, Inc. **Ansyst Fluent User's Guide**. Release 2021 R2. Canonsburg: 2021a.
- ANSYS, Inc. **Ansyst Meshing User's Guide**. Release 2021 R2. Canonsburg: 2021b.
- AHMED, S. R.; Ramm, G; Faltin, G. **Some Salient Features of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake**. Michigan, USA: SAE Technical Paper Series, 1984.
- BLAZEK, Jiri. **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**. 3 ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2015.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John. M. **Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications**. 3 ed. New York, USA: McGraw-Hill Companies, 2014.
- DE CHRISTO, Bruno Vinícius. Estudo aerodinâmico de um protótipo de eficiência energética. **9º JEPEX e 3º Mostra Cultural**, 2020. Disponível em: <<https://eventos.ifrs.edu.br/index.php/JEPEXErechim/JepexErechim2020/paper/viewFile/9029/4400>>. Acesso em: 14 de mar. de 2023.
- DOSIL, Daniel Fiuza. **Aerodynamic Analysis and Desing of a Car for the Shell Eco Marathon**. 2016. 124 f. Thermal Energy and Process Engineering. Aalborg University, Aalborg, 2016.
- EIKELAND, Henrik Aaserud. **Aerodynamic Development and Construction of a Car for Participation in the Eco-Marathon Competition**. 2010. 70 f. Energy and Process Engineering. Norwegian University of science and technology, Noruega, 2010.
- EPA, **Environmental Protection Agency**, U.S. Transportation Sector Greenhouse Gas Emissions 1990 –2020, 2022. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P10153PC.pdf>>. Acesso em: 10 de mar. de 2023.
- FERZIGER, Joel H. **Computational methods for fluid dynamics**. 3 ed. New York, USA: Springer, 2002.
- GUTIERREZ, Jorge E. C.; DUARTE, Luis E. V.; OLIVEIRA JR., Amir A. M.; CANCINO, Leonel R. The Ahmed body's external aerodynamics at 25° slant angle rear surface: a numerical analysis using CFD. *In: 18TH BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING*, 2020. **Anais eletrônicos**. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/217969/ENCIT2020-0060-JECGutierrez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 15 de out. de 2023.
- IEA, **International Energy Agency**. Key World Energy Statistics 2021, 2021. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021>>. Acesso em: 17 de mar. de 2023.
- KATZ, Joseph. **Automovite Aerodynamics**. San Diego: John Wiley & Sons, 2016.
- MIKA, Jefferson. **Concepção de uma carenagem e análise aerodinâmica de um conceito de veículo elétrico urbano da equipe EFICEM**. Orientador: Dr. Marcos Alves Rabelo. 2021. 100 f. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Aeroespacial, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/230470>>. Acesso em: 05 de out. de 2023.
- OBIDI, T. Yomi. **Theory and Applications of Aerodynamics for Ground Vehicles**. Warrendale, USA: SAE International, 2014.
- RODRIGUES, Jorge F. C. **CFD Study of the Aero@UBI03 Shell EcoMarathon 2019 Prototype**. Orientador: Prof. Doutor Miguel Ângelo Rodrigues Silvestre. 2021. 80 f. Tese Mestrado – Engenharia Aeronáutica. Universidade Beira Interior.

SANTIN, J.J.; ONDER, C.H.; BERNARD, J.; ISLER, D.; KOBLER, P.; KOLB, F.; WEIDMANN, N.; GUZZELLA, L. **The World's Most Fuel Efficient Vehicle: Design and Development of PAC-CAR II**. Zurich/Singen: London, UK, 2007.

SAPIO, Giovanni. **Numerical Study of the Aerodynamics of a Shell Eco-marathon Prototype Car and Experimental Validation**. 2016. 126 f. Departamento de Engenharia Enzo Ferrari. Università Degli Studi Di Modena E Reggio Emilia. Módena, Italia, 2016.

SCHUETZ, Thomas. **Aerodynamics of Road Vehicles**. 5 ed. Warrendale, USA: SAE International, 2016.

SENATRAN, **Secretaria Nacional de Trânsito**. Estatísticas - Frota de Veículos – SENATRAN, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/estatisticas-frotade-veiculos-senatran>>. Acesso em: 09 de mar. de 2023.

SHANKARA, Prashanth. The most aerodynamic car designed with Siemens software (Webinar). **Siemens**, 2018. Disponível em: < <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/the-most-aerodynamic-car-designed-with-siemens-software-webinar/>>. Acesso em: 01 de nov. 2023.

SINDIPEÇAS, **Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores**. Relatório da Frota Circulante, 2022. Disponível em: <[https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2022/RelatorioFrotaCirculante\\_2022.pdf](https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2022/RelatorioFrotaCirculante_2022.pdf)>. Acesso em: 09 de mar. de 2023.

WÄSCHLE, Alexander. **Numerische und experimentelle Untersuchung des Einflusses von drehenden Rädern auf die Fahrzeugaerodynamik**. Universidade de Estugarda, 2006.

WHITE, Frank M. **Fluid Mechanics**. 7 ed. New York: McGraw-Hill Companies, 2011.