

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

FABIO DE CERQUEIRA KNABBEN

ESTUDO AERODINÂMICO DE VEÍCULO ELÉTRICO COMERCIAL LEVE

Joinville

2025

FABIO DE CERQUEIRA KNABBEN

ESTUDO AERODINÂMICO DE VEÍCULO ELÉTRICO COMERCIAL LEVE

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.

Joinville

2025

FABIO DE CERQUEIRA KNABBEN

ESTUDO AERODINÂMICO DE VEÍCULO ELÉTRICO COMERCIAL LEVE

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 11 de dezembro de 2025.

Banca Examinadora:

Prof. Leonel R. Cancino, Dr. Eng.
Orientador / Presidente

Prof. Dr. Antônio Otaviano Dourado
Membro
UFSC

Prof. Dr. Diogo Lôndero da Silva
Membro
UFSC

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram ao longo de toda minha trajetória acadêmica, nos projetos do fórmula CEM, nos trabalhos com prazos para ontem e nos litros de café ingeridos para cancelar o sono. Aos meus amigos que a UFSC apresentou e todos que me encorajaram a não desistir. E acima de tudo, a minha família, que sempre me ajudou sem medir esforços.

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer à minha namorada Jéssica, que sempre me apoiou nas decisões que tomei, que me inspirou para perseguir meu sonho de se tornar engenheiro automotivo e que hoje é minha melhor amiga e meu amor. A transição de carreira não seria possível sem apoio incondicional dos meus pais, Aldecy e Eliane, irmãs, Fernanda e Mariana e dos meus cachorros, Ghost e Kaname.

Também sou grato aos meus amigos e colegas que me acompanharam durante esses longos 8 anos, especialmente ao meu primo Renan Knabben, que me apresentou o curso e a equipe do fórmula SAE. Aos meus amigos mais próximos de eng. Ferroviária, Gabriel, Victor e Lucas, que me acolheram logo no início do curso e me apoiam até hoje. Aos da engenharia automotiva, Ariel e Yago, que me incentivaram a me desenvolver como membro da equipe de FSAE e ser um estudante mais dedicado. Também gostaria de agradecer especialmente: André, Mentz, Zane, Gustavo, Nomura, Renan (DK), Leo CG, Enrico, João Anuto e a todos integrantes do grupo “time fim de curso”. Ao meu irmão de longa data, Thiago, que acompanhou toda a jornada da engenharia, sempre estando disponível para ouvir e aconselhar.

Esse trabalho não seria possível sem o apoio do meu orientador, Prof. Dr. Leonel R. Cancino, que me auxiliou quando mais foi preciso. Também estendo meus agradecimentos aos colegas que chamo de “rede de apoio da simulação”, Kevin Lima, Matheus Buvalovas e Lucas “Phenx”, que sempre estavam presentes quando as simulações falhavam para dar dicas, conselhos e discutir sobre como o Ansys pode ou não gerar os resultados esperados.

Por último, agradeço ao Coordenador do curso Prof. Dr. Sérgio Junichi Idehara e ao prof. Modesto Hurtado Ferrer, que sempre me ajudaram no possível, desde a troca de curso de engenharia ferroviária para automotiva, à cancelamentos de matérias por motivos variados. A todos que caminharam ao meu lado, meus sinceros agradecimentos.

*“Nach der so genannten Abtriebsformel ($F = \rho \cdot 2 \cdot v^2 \cdot A \cdot C_a$)
Könnte dieser Porsche 956 bei einem Tempo von 321,4 km/h theoretisch na der
Decke fahren”*

RESUMO

O aquecimento global e as emissões de gases de efeito estufa são tópicos em destaque mundialmente e tem sido foco no desenvolvimento da indústria automotiva. Os veículos comerciais, como furgões, que circulam dentro das cidades, geralmente movidos a diesel, englobam uma parte significativa de toda a frota, sendo responsáveis pelas entregas de mercadoria nos centros urbanos de todo o mundo. A eletrificação desses veículos é a melhor forma de reduzir os poluentes emitidos pela combustão e para ampliar a autonomia das baterias, a otimização aerodinâmica é um meio para aprimorar a eficiência. Apresenta-se neste trabalho uma análise aerodinâmica do furgão elétrico Arrow One. O estudo foi realizado avaliando os coeficientes de arrasto (C_D), sustentação (C_L) e pressão (C_P), esteira e vórtices, com auxílio do software Ansys Fluent 2025 R02. Todas as simulações foram realizadas em espaço tridimensional, regime permanente, escoamento incompressível, velocidade de 22.22 m/s e modelo de turbulência e $k-\omega$ SST. Os resultados obtidos foram de 0,3334 para o coeficiente de arrasto e de 12,24kW para a potência de arrasto.

Palavras-chave: CFD; aerodinâmica; eficiência; veículo elétrico; furgão;

ABSTRACT

Global warming and greenhouse gas emissions are major worldwide concerns and have become a central focus in the development of the automotive industry. Commercial vehicles, such as vans operating in urban environments and commonly powered by diesel engines, represent a significant portion of the vehicle fleet and are responsible for delivering goods in city centers around the world. Electrification of these vehicles is the most effective way to reduce pollutants generated by combustion, and aerodynamic optimization is a key strategy to improve efficiency and extend battery range. This study presents an aerodynamic analysis of the Arrow One electric van. The investigation evaluated the drag (C_D), lift (C_L), and pressure (C_P) coefficients, as well as the wake and vortex structures, using Ansys Fluent 2025 R02. All simulations were conducted in a three-dimensional domain, under steady-state, incompressible flow conditions, at a velocity of 22.22 m/s, employing the $k-\omega$ SST turbulence model. The results obtained were a drag coefficient of 0.3334 and 12,24 kW of drag power.

Keywords: CFD; aerodynamics; efficiency; electric vehicle; van;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estados do escoamento externo	24
Figura 2 - Camada-limite sobre uma placa plana.....	26
Figura 3 - Evolução do coeficiente de arrasto com a diminuição da área frontal	27
Figura 4 - Fluxo ao redor e região de esteira de um veículo notchback.....	28
Figura 5 - Coeficiente de sustentação e fatores de influência	30
Figura 6 - Velocidade relativa do ar e condições de pressão sobre um veículo em movimento.....	31
Figura 7 - Arrow One.....	40
Figura 8 - Dimensões gerais Arrow One	40
Figura 9 - Modelo CAD original (a) e modelo simplificado (b)	41
Figura 10 - Área frontal	42
Figura 11 - Retrovisor.....	42
Figura 12 - Área Lateral	43
Figura 13 - Área superior	43
Figura 14 - Assoalho	44
Figura 15 – Roda frontal e filete de contato pneu-solo.....	44
Figura 16 – Área traseira.....	45
Figura 17 – Condições de contorno	46
Figura 18 – Valores de referência	48
Figura 19 – Dimensões para o túnel de vento.....	50
Figura 20 – Dimensões do túnel de vento	50
Figura 21 – Corpos de influência.....	51
Figura 22 – Comparação entre malhas	59
Figura 23 – Camadas Prismáticas	59
Figura 24 – Resíduos da solução final	64
Figura 25 - Balanço de massa.....	65
Figura 26 – Velocidade em um ponto da esteira	65
Figura 27 – Evolução da força de arrasto (N).....	66
Figura 28 – Evolução da força de arrasto (N).....	67
Figura 29 – Força de arrasto por região do veículo.....	68
Figura 30 – Evolução da força de sustentação	70
Figura 31 – Vista frontal do C_P	71

Figura 32 – Vista lateral do C_P	72
Figura 33 - Vista superior do C_P	73
Figura 34 - Vista inferior do C_P	74
Figura 35 - Vista posterior do C_P	74
Figura 36 – Campo de C_P no plano de simetria	75
Figura 37 – Velocidade do escoamento no plano de simetria	76
Figura 38 – Campo de energia cinética turbulenta no plano de simetria.....	77
Figura 39 – Comprimento da energia cinética turbulenta no plano de simetria.....	77
Figura 40 – escoamento resultante do retrovisor	78
Figura 41 – Região turbulenta do retrovisor	79
Figura 42 – escoamento resultante das rodas e assoalho	80
Figura 43 – detalhe do escoamento na cavidade frontal do assoalho.....	81
Figura 44 – detalhe do escoamento na cavidade central do assoalho.....	81
Figura 45 – detalhe do escoamento na cavidade traseira do assoalho.....	82
Figura 46 – escoamento resultante do teto e traseira	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração das malhas geradas	58
Tabela 2 – Resultado das malhas	61
Tabela 3 – Comparação do GCI e Incerteza entre as malhas.....	62
Tabela 4 – Força de arrasto e C_D por região.....	68
Tabela 5 – Dados para cálculo da potência de arrasto	84
Tabela 6 – Potência e energia de arrasto em diferentes velocidades	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AIE</i>	Agência internacional de energia
<i>CFD</i>	Dinâmica dos fluidos computacionais
<i>GCI</i>	Índice de convergência da malha
<i>ONU</i>	Organização das Nações Unidas
<i>RANS</i>	Navier-Stokes com médias de Reynolds
<i>SST</i>	Transporte de tensão de cisalhamento
<i>VEs</i>	Veículos Elétricos
<i>WWF</i>	World Wildlife Fundation

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área frontal do veículo
C_D	Coefficiente de arrasto
C_L	Coefficiente de sustentação
C_P	Coefficiente de pressão
F	Força resultante
F_D	Componente longitudinal da força (arrasto)
F_L	Componente vertical da força (sustentação)
F_S	Componente lateral da força (força lateral)
L	Comprimento característico
Re_L	Número de Reynolds baseado no comprimento característico
SC	Superfície de controle
U	Velocidade característica do escoamento
V	Velocidade relativa do fluido em relação ao objeto
VC	Volume de controle
ϵ	Taxa de dissipação turbulenta
μ	Viscosidade dinâmica
μ_p	Coefficiente de atrito do pneu
μ_t	Viscosidade turbulenta
ω	Taxa específica de dissipação turbulenta
ρ	Densidade do fluido
\vec{F}	Vetor força aplicado no corpo
\vec{M}_o	Momento da força em relação ao ponto de referência (O)
\vec{f}	Vetor de forças de volume atuando sobre o fluido
\vec{g}	Vetor gravidade
\vec{n}	Vetor normal à superfície de controle
\vec{r}	Vetor posição entre o ponto de referência e a linha de ação da força
\vec{v}	Vetor velocidade do fluido
f_1	Valor da grandeza avaliada na malha mais refinada
f_2	Valor da grandeza avaliada na malha menos refinada
k	Energia cinética turbulenta
l	Distância entre eixos

p_{gci}	Ordem observada de convergência
p	Pressão
$r = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}$	Razão de refinamento entre as malhas
t	Tempo
u	Velocidade na direção x
y^+	Distância adimensional da parede
τ	Tensões viscosas
$ \epsilon $	Erro relativo entre as soluções de diferentes malhas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	19
1.1.1 Objetivo Geral	19
1.1.2 Objetivos Específicos	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1 MECÂNICA DOS FLUIDOS	20
2.1.1 CONSERVAÇÃO DA MASSA	20
2.1.2 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO	21
2.1.3 EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES	22
2.2 AERODINÂMICA VEICULAR	23
2.2.1 escoamento externo	23
2.2.2 Camada-limite	26
2.2.3 Área frontal	27
2.3 COEFICIENTES AERODINÂMICOS	27
2.3.1 Coeficiente de arrasto (C_D)	28
2.3.2 Coeficiente de sustentação (C_L)	29
2.3.3 Coeficiente de pressão (C_P)	30
2.4 PERDAS DE POTÊNCIA POR ARRASTO	32
2.5 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)	32
2.5.1 Métodos dos volumes finitos	33
2.5.2 Modelos de turbulência	34
2.5.2.1 Energia cinética turbulenta (k)	35
2.5.2.2 Modelo de turbulência $k - \epsilon$	35
2.5.2.3 Modelo de turbulência $k - \omega$ SST	37
2.5.3 Índice de convergência da malha (CGI)	38
2.5.3.1 Fator de refino entre as malhas (r)	39
2.6 VEÍCULO ARROW-ONE	40
3 METODOLOGIA	41
3.1 GEOMETRIA DE ESTUDO	41
3.1.1 Área frontal	42
3.1.2 Retrovisor	42
3.1.3 Área Lateral	43

3.1.4 Área superior	43
3.1.5 Assoalho	44
3.1.6 Rodas	44
3.1.7 Área traseira	45
3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO	45
3.2.1 Velocidade de escoamento	46
3.2.2 Intensidade de turbulência e taxa de viscosidade turbulenta	46
3.2.3 Paredes móveis	46
3.2.4 Paredes fixas	47
3.2.5 Simetria	47
3.3 CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA	48
3.4 DESENVOLVIMENTO DA MALHA	49
3.4.1 Domínio computacional	49
3.4.2 Corpos de influência	51
3.4.3 Elementos de malha	52
3.4.4 Tratamento de parede	53
3.4.5 Estimativa da primeira célula y	54
3.4.6 Número de camadas prismáticas	55
3.4.7 Refinos de curvatura	56
3.5 AVALIAÇÃO DAS MALHAS GERADAS	57
3.6 RECURSOS COMPUTACIONAIS	60
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1 AVALIAÇÃO DAS MALHAS GERADAS – GCI	60
4.2 ANÁLISE DE RESÍDUOS	63
4.3 ANÁLISE DOS COEFICIENTES AERODINÂMICOS	66
4.3.1 Força e coeficiente de arrasto (C_D)	66
4.3.2 Força e coeficiente de sustentação (C_L)	70
4.3.3 Coeficiente de pressão (C_P)	71
4.4 ANÁLISE DA ESTEIRA E VORTICIDADE	75
4.5 POTÊNCIA E CONSUMO DO ARRASTO	84
5 CONCLUSÃO	86
REFERÊNCIAS	88

1. INTRODUÇÃO

Em um mundo que tem experienciado temperaturas cada vez mais altas, a eficiência energética é mais importante do que nunca. O aumento do efeito dos gases de efeito estufa devido a atividades humanas, como o uso de combustíveis fósseis, tem contribuído para o aumento das temperaturas médias globais, ocasionando eventos climáticos extremos, derretimento de calotas polares, elevação do nível do mar e desequilíbrios ambientais (WWF, 2012).

Para minimizar tal situação, em 2015 foi assinado o tratado de Paris, que estabelece metas para o aquecimento global, mantendo o aumento da temperatura média abaixo de dois graus por ano. O acordo, assinado por 195 países, reforça a importância da redução das emissões de CO₂ e promove a transição para o uso de energias limpas, como a eletrificação dos veículos (ONU, 2023).

De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE, 2023), pelo menos 20% de todo setor de transporte rodoviário deverá de ser elétrico até 2030 para que a meta do acordo seja alcançada. Já para a Organização das Nações Unidas (ONU, 2018), mesmo que o número de veículos duplique até 2050, com a eletrificação de seus motores, os níveis de emissão poluentes podem estabilizar e até serem reduzidos para abaixo dos valores do ano 2000.

Como resposta à regulamentação de emissões cada vez mais rigorosas e pela conscientização ambiental, a adoção de veículos elétricos vem aumentando consideravelmente em todo mundo. Mas um dos desafios que barram a adoção generalizada, é o alcance limitado das baterias, quando comparado diretamente com veículos movidos a combustão interna (Noel *et al.* 2020). Para a AIE (2021), melhorar o alcance através de avanços nas tecnologias das baterias e de carregamento são fatores essenciais para o sucesso da transição energética necessária.

Enquanto o desenvolvimento de novas tecnologias para aumentar a autonomia das baterias caminha a passos largos, outro ponto crítico que tem sido aprimorado é a redução das forças aerodinâmicas (Remmerie, 2022). Um projeto otimizado e aerodinamicamente eficiente contribui para a redução do arrasto, minimizando a resistência do ar e permitindo seu deslocamento com maior eficácia. Além disso, novos difusores de ar, aerofólios, materiais e técnicas de design estão sendo exploradas para reduzir, ainda mais, o arrasto, aumentando a eficiência energética dos VEs (Selvan *et al.* 2022).

O estudo da redução de arrasto em veículos não é algo novo. Desde meados do século 20, engenheiros e pesquisadores começaram a estudar o comportamento do fluxo do ar ao redor dos automóveis utilizando túneis de vento. Segundo Ludvigsen (1970), em 1923 R. Conrad alcançou o valor de 0,30 para o coeficiente de arrasto, metade do valor encontrado nos automóveis da época, representando um marco para o desenvolvimento da aerodinâmica veicular.

À medida que a tecnologia dos túneis de vento e o entendimento de aerodinâmica avançava, a complexidade da geometria dos veículos aumentou também, sendo necessário recorrer a ferramentas menos onerosas, tanto financeiramente quanto em dispêndio de tempo, como a mecânica de fluidos computacional (CFD) (Dhaubhadel, 1996).

O CFD tem se tornado fundamental para o desenvolvimento de novos veículos, pois permite a realização de alterações de projeto antes mesmo que seja aprovado para a produção e comercialização. A combinação das simulações CFD e do túnel de vento permite uma análise mais precisa, enquanto no CFD pode-se simular fluxos de ar complexos e não facilmente mensuráveis, nos túneis de vento os resultados podem ser validados experimentalmente, assim desenvolvendo veículos mais eficientes (Dhaubhadel, 1996).

Os principais parâmetros analisados na aerodinâmica veicular são, o coeficiente de arrasto, com influência direta sobre a eficiência energética do veículo, o coeficiente de sustentação, que afeta a estabilidade do veículo e o coeficiente de pressão, pois ajuda a identificar os pontos de estagnação que aumentam a resistência do ar e geram mais arrasto. Também é estudado a minimização de ruídos do vento, aumentando o conforto sonoro dos passageiros durante a utilização do veículo (Heisler, 2002).

A análise aerodinâmica dos veículos tem se tornado fundamental na busca por soluções que maximizem a eficiência energética. À medida que as leis e regulamentos ambientais se tornam mais restritas, principalmente em centros urbanos, a utilização de transporte movido a combustíveis fósseis, como ônibus e vans, vem sendo substituída por equivalentes elétricos. Segundo O'Connell *et al.* (2023), veículos comerciais elétricos como caminhões e ônibus superam seus semelhantes a diesel, hidrogênio e gás natural na redução das emissões de gases de efeito estufa ao longo de sua vida útil em até 63%.

A transição para veículos comerciais elétricos é uma etapa crucial para uma frota mais sustentável e eficiente, com a análise CFD desempenhando um papel vital na otimização aerodinâmica, proporcionando máxima eficiência energética. Portanto, é nesse sentido que se apresenta a análise aerodinâmica do furgão Arrow One, realizada no software de dinâmica de fluidos computacional, Ansys Fluent, com os resultados obtidos do escoamento em simulações com velocidade de 22.22 m/s (80 km/h).

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática da aerodinâmica de veículos comerciais leves propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Análise do escoamento ao redor do veículo selecionado, o Arrow One, visando identificar oportunidades de aumento da eficiência aerodinâmica e estudo dos pontos de estagnação de pressão na velocidade de, 22.22 m/s.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Aferir o coeficiente de arrasto total;
- Medir o coeficiente de sustentação total;
- Avaliar o coeficiente de pressão ao redor do veículo;
- Estimar a contribuição para o coeficiente de arrasto das partes de interesse maior (capô, para-brisa, retrovisores, caixas de roda...);
- Identificar os pontos de estagnação de pressão;
- Analisar o comportamento do fluido ao redor do veículo (camada limite, separação do escoamento, vorticidade, esteira...);
- Avaliar a potência de arrasto;

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No mundo, ocorre uma crescente conscientização acerca dos impactos ambientais, que impulsionam a transição dos veículos a combustão interna para os elétricos. A eletrificação tem sido vista como uma solução promissora para a redução das emissões de poluentes e dependência de combustíveis fósseis (Ehsani *et al.* 2004). Assim, o furgão elétrico Arrow One se destaca na logística urbana, mitigando as emissões de poluentes do transporte tradicional.

O presente estudo propõe uma análise aerodinâmica do escoamento ao redor do veículo, campo crítico que influencia diretamente na sua eficiência energética e autonomia. A necessidade de compreender o comportamento aerodinâmico é enfatizada pelo possível aumento da autonomia, redução do consumo energético e ruído, e, por consequência, a minimização das emissões associadas ao seu uso (Huluka e Kim, 2009).

Considerando isso, esse capítulo apresenta conceitos gerais da dinâmica dos fluidos e da aerodinâmica veicular, assim como uma introdução sobre o software utilizado para a análise.

2.1 MECÂNICA DOS FLUIDOS

A mecânica dos fluidos estuda o comportamento dos fluidos tanto em estado de repouso quanto em movimento. De acordo com White, (2011), a compreensão dos fenômenos que regem a mecânica dos fluidos é crucial para a solução de problemas de engenharia. O autor aborda que a compreensão do estudo dos escoamentos pode ser realizada por duas principais formas, a abordagem integral, que foca na aplicação das leis da física (como a conservação da massa) em um volume de controle (região finita) e a abordagem diferencial, que examina uma região infinitesimal do escoamento, onde as leis físicas são aplicadas (equação de Navier-Stokes) para obter detalhes em pontos específicos do escoamento.

2.1.1 CONSERVAÇÃO DA MASSA

A equação da conservação de massa, também chamada de equação de continuidade, é um princípio fundamental da mecânica dos fluidos, que afirma que a

massa de um fluido não pode ser alterada. Ela é aplicada diretamente sobre um volume de controle, relacionando o acúmulo de massa dentro desse volume com os fluxos que atravessam suas superfícies (White, 2011). A forma integral da equação é da conservação da massa é expressa por:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0, \quad (1)$$

onde:

ρ – densidade do fluido;

VC – volume de controle

SC – superfície de controle;

\vec{v} – vetor velocidade do fluido;

\vec{n} – vetor normal à superfície de controle.

A formulação apresentada por White (2011) é válida para escoamentos compressíveis e incompressíveis, tanto em regime permanente quanto transitório.

2.1.2 CONSERVAÇÃO DA QUANTIDADE DE MOVIMENTO

O princípio da conservação da quantidade de movimento estabelece que a taxa de variação da quantidade de movimento de um sistema é igual a soma das forças externas que atuam sobre ele (White, 2011). Este princípio pode ser escrito na forma integral como:

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \vec{v} dV + \int_{SC} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \sum \vec{F}_{ext}, \quad (2)$$

sendo:

$\sum \vec{F}_{ext}$ – Somatório das forças externas.

Essa expressão mostra que a variação temporal da quantidade de movimento em um volume de controle, somada ao fluxo através de suas superfícies, é equilibrada pelas forças externas que agem sobre o fluido (pressão, viscosidade e gravidade). Na forma diferencial, a equação (2) assume a seguinte forma:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V}\vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho\vec{g}, \quad (3)$$

onde:

t – tempo;

p – pressão;

τ – tensor das tensões viscosas;

\vec{g} – vetor aceleração da gravidade;

Os termos da equação representam a variação local do momento linear, o transporte convectivo, as forças viscosas, as forças de pressão e as forças de corpo. Essa formulação é a fundação das equações de Navier-Stokes, que são amplamente utilizadas na descrição de escoamentos viscosos e indispensáveis para análise numérica computacional em dinâmica dos fluidos (White, 2011).

2.1.3 EQUAÇÃO DE NAVIER-STOKES

A equação de Navier-Stokes é a base da dinâmica dos fluidos, representando o princípio da conservação da quantidade de movimento aplicado a um fluido newtoniano. Segundo White (2011), ela é o resultado da combinação da equação da quantidade de movimento com a segunda lei de Newton, acrescentada da hipótese de que as tensões viscosas são proporcionais às taxas de deformação do fluido. Para um escoamento incompressível, a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \vec{f}, \quad (4)$$

onde:

μ – viscosidade dinâmica;

\vec{f} – vetor de forças que agem sobre o fluido;

White (2011) afirma que essa equação representa o modelo matemático mais abrangente para descrever o comportamento de um fluido em movimento. Cada termo da equação possui uma definição física bem definida: a inércia, pressão, viscosidade e força externa sobre o fluido (Fox *et al.*, 2013).

No entanto, a solução analítica dessa equação é limitada a casos simples, como em situações de escoamento em placas paralelas ou em tubos circulares (White, 2011). Para problemas de engenharia, recorre-se ao uso de métodos numéricos implementados em CFD, em que o domínio do escoamento é discretizado em uma malha geométrica, e as equações se tornam sistemas algébricos que são resolvidos iterativamente. O uso de CFD permite a análise de escoamentos complexos, possibilitando a previsão de campos de velocidade e pressão em geométricas realistas. Entretanto, existe a necessidade de definição correta das condições de contorno, escolha do modelo de turbulência e verificação da consistência das soluções numéricas (White, 2011).

Para o presente trabalho, foram aplicadas hipóteses que simplificam a análise de escoamento ao redor do veículo, tornando o problema mais tratável. Considera-se o fluido incompressível, uma vez que o escoamento ocorre em baixos números de Mach, assumindo a densidade como constante sem perda significativa de precisão (White, 2011). Os efeitos gravitacionais também foram desconsiderados, pois sua contribuição é desprezível diante das forças aerodinâmicas analisadas. Além disso, o escoamento é considerado viscoso e tridimensional, o que permite uma melhor análise dos efeitos do atrito e da separação da camada limite, aspectos fundamentais em estudos aerodinâmicos de veículos (Fox *et al.*, 2013) e por fim, adota-se o regime permanente, onde as propriedades do fluido em um ponto fixo do espaço não variam com o tempo, removendo a dependência temporal das variáveis (White, 2011).

2.2 AERODINAMICA VEICULAR

2.2.1 Escoamento externo

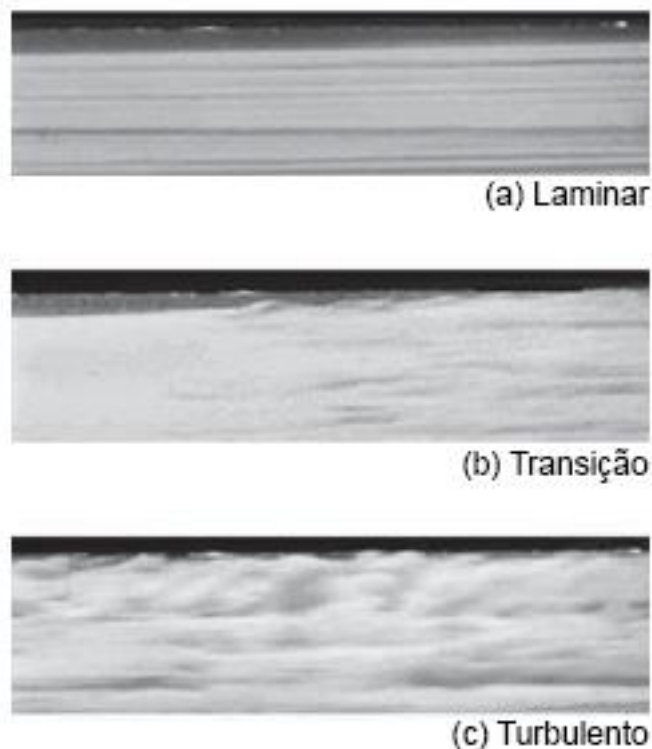
O escoamento externo refere-se ao fluxo de ar em torno de veículos em movimento. Esse fenômeno é muito importante para a aerodinâmica veicular, pois afeta diretamente o consumo de combustível, a estabilidade e a segurança do veículo.

De acordo com Çengel e Cimbala (2014), o escoamento pode ser classificado como compressível ou incompressível e ainda, a incompressibilidade é uma aproximação, na qual o fluxo é considerado incompressível se a densidade permanecer praticamente constante ao longo do processo, situação típica de escoamentos externos em baixas velocidades, onde as variações de pressão não são

suficientes para produzir alterações relevantes nas propriedades termodinâmicas do fluido (White, 2011).

O escoamento também pode ser classificado como laminar ou turbulento. O fluxo laminar é caracterizado por camadas de fluido suaves e regulares, com alta organização do movimento, enquanto o turbulento possui flutuações na velocidade, gerando uma instabilidade nas camadas do fluido pela formação de vórtices (Çengel e Cimbala, 2014). Um escoamento laminar não se transforma em turbulento imediatamente, ocorrendo uma zona de transição entre os dois estados. Os estados do escoamento externo (Figura 1) mostram as três situações, (a) laminar, (b) transição e (c) turbulento e é possível perceber que o escoamento turbulento é tridimensional, transiente, caótico e desordenado.

Figura 1 – Estados do escoamento externo



Fonte: Adaptado de Çengel e Cimbala (2014, p. 11)

A região da transição do escoamento laminar para turbulento é influenciada por vários fatores, como a rugosidade da superfície, velocidade do fluido, temperatura, pressão, entre outros.

Para determinar se o escoamento é laminar ou turbulento usa-se o número de Reynolds (Re) (Equação 5), onde V_∞ é a velocidade de corrente livre, X é a posição a partir da borda de ataque e ν é a viscosidade cinemática. O Re é a medida física da razão entre as forças de inércia e as forças viscosas em um escoamento, sendo um dos parâmetros mais importantes em dinâmica dos fluidos (Anderson, 2017). Para escoamento interno, os valores de $Re \leq 2300$, o fluxo é considerado laminar, turbulento para $Re \geq 4000$ e transição no intervalo intermediário (Çengel e Cimbala, 2014).

$$Re_x = \frac{V_\infty \cdot x}{\nu} \quad (5)$$

Já para o externo, o escoamento pode ser caracterizado nesses regimes em diferentes faixas de velocidade, não tendo limites fixos, pois dependem das condições mencionadas anteriormente. Para uma placa plana lisa, a transição de laminar para turbulento ocorre próximo a $Re \approx 1,3 \times 10^5$, porém não se torna totalmente turbulento antes que o valor de Reynolds atinja em torno de $Re = 3 \times 10^6$. Para projetos de engenharia, o valor crítico do número crítico de Reynolds é $Re_c = 5 \times 10^5$ (Çengel e Cimbala, 2014). Portanto, para determinar se o regime é laminar ou turbulento em determinada coordenada (X), utiliza-se a fórmula para o número de Reynolds crítico (Equação 6), onde ρ é a densidade do fluido, V_∞ é a velocidade de escoamento livre e μ é a viscosidade e seu resultado é comparado com Re_c .

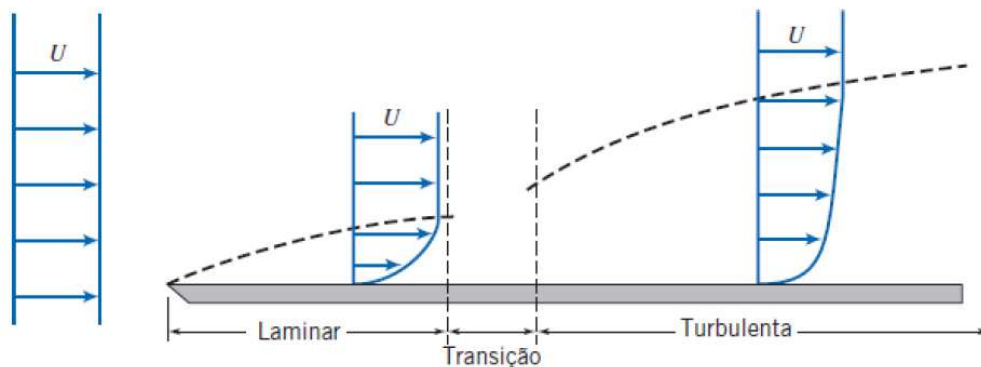
$$Re_{x,c} = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot x_c}{\mu} = 5 \cdot 10^5 \quad (6)$$

O escoamento externo também pode ser dividido em duas regiões, sendo a primeira a camada limite, região do fluxo adjacente à parede da superfície no qual os efeitos viscosos são significativos (Çengel e Cimbala, 2014) e o fluxo não viscoso fora da camada limite. A espessura da camada limite é definida pela distância entre a superfície, que possui velocidade de fluido zero, até o ponto em que o escoamento atinge a velocidade de 99% da velocidade de corrente livre (White, 2011).

2.2.2 Camada-limite

A camada-limite é a região próxima a parede do escoamento sobre a superfície de um veículo em que os efeitos viscosos se tornam relevantes. Isto é, gera uma região de não deslizamento (*no-slip*), que impõe velocidade nula do fluido na interface com a superfície sólida, gerando um gradiente de velocidade em direção ao escoamento externo (Fox *et al.*, 2013). A figura 2 mostra o crescimento de uma camada-limite sobre uma placa plana. Em primeiro momento, ela é laminar, por uma curta distância após a borda de ataque. Em seguida, ocorre a área de transição, que ocorre ao longo de uma faixa da superfície, se estendendo até o ponto em que a camada-limite se torna turbulenta.

Figura 2 - Camada-limite sobre uma placa plana.



Fonte: Adaptado de Fox *et al.*, (2013)

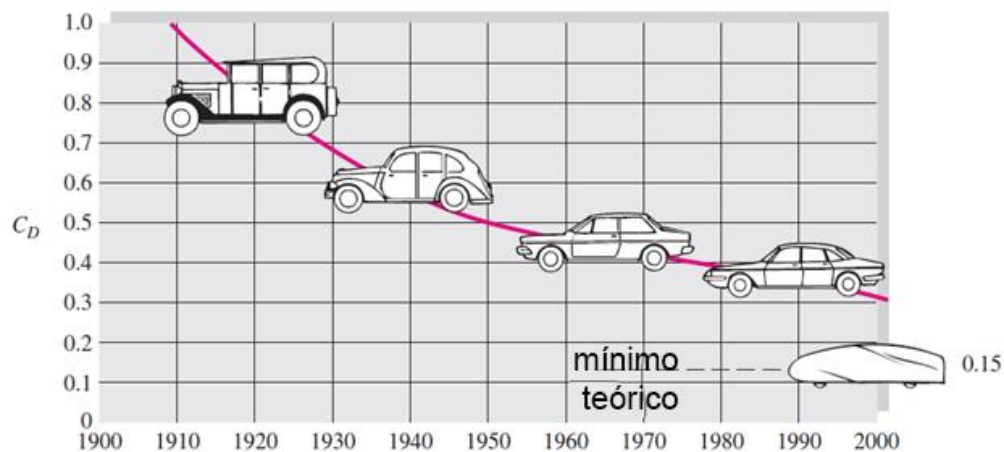
Por apresentar um perfil de velocidades característico, em que sua velocidade cresce gradativamente da parede até o valor do escoamento livre, seu desenvolvimento depende de fatores como a posição ao longo da superfície, a rugosidade superficial e o regime de escoamento (Fox *et al.*, 2013).

Para a aerodinâmica veicular, a camada-limite é de grande importância, pois sua separação pode provocar aumento significativo de arrasto e alterar a distribuição de pressões sobre o veículo. Esses efeitos impactam diretamente a eficiência energética, estabilidade e o desempenho global do automóvel (Katz e Plotkin, 2001).

2.2.3 Área frontal

A área frontal de um veículo é definida como a área projetada perpendicularmente a direção do escoamento, sendo a superfície efetiva no qual o fluido exerce forças de resistência. Este parâmetro é fundamental para o cálculo da força de arrasto, como é apontado na equação 7. Com o passar dos anos, os veículos modernos tiveram redução em sua área frontal, possibilitando a redução do coeficiente de arrasto diretamente. A figura 3 mostra a evolução com o passar dos anos do design dos veículos e seu coeficiente de arrasto.

Figura 3 - Evolução do coeficiente de arrasto com a diminuição da área frontal



Fonte: Adaptado de White, (2011)

Katz e Plotkin (2001) destacam que, para veículos terrestres, o produto $C_d A$ é comumente utilizado, pois reflete a magnitude da resistência aerodinâmica exercida pelo fluido no automóvel. Portanto, da mesma maneira que a camada-limite afeta a eficiência energética, a área frontal projetada constitui-se de um parâmetro de projeto crítico, afetando o desempenho global do veículo.

2.3 COEFICIENTES AERODINÂMICOS

A aerodinâmica tem um papel importante no processo de projeto da carroceria do automóvel. Um veículo que se movimenta imerso em um fluido, como o ar, está submetido a campos de escoamento ao seu redor que podem ser divididos em três categorias, conforme Hucho (1998), o fluxo de ar ao redor da carroceria, fluxo interno, para radiador, motor etc. e o fluxo de ar que passa pelo habitáculo interno. Neste

estudo, o fluxo ao redor do veículo será analisado com os seguintes coeficientes aerodinâmico: arrasto, sustentação e pressão.

2.3.1 Coeficiente de arrasto (C_D)

O principal parâmetro na aerodinâmica veicular é o coeficiente de resistência ao arrasto (C_D), que influencia diretamente a eficiência energética do veículo, ou seja, sua economia de combustível. O arrasto aerodinâmico total pode ser expresso pela equação (Fox *et al.*, 2013):

$$C_D = \frac{2F_d}{\rho V^2 A} \quad (7)$$

onde:

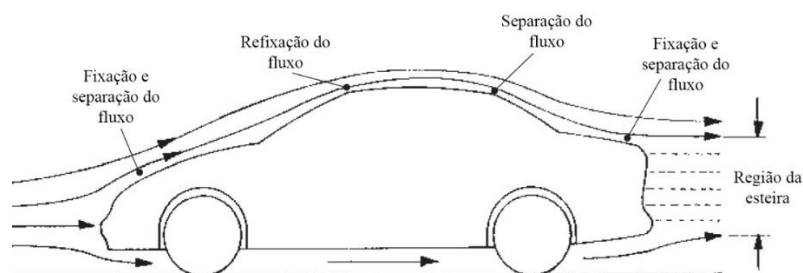
F_d – componente longitudinal da força(arrasto);

V - velocidade relativa do fluido em relação ao veículo;

A – área frontal do veículo;

O arrasto consiste em duas componentes principais, a fricção do fluido, dependente da geometria devido a separação da camada limite da superfície e a região de esteira que se forma atrás do veículo. Essas duas componentes podem ser identificadas na figura 2, adaptada de Heisler (2002), que mostra as regiões de fixação e separação do escoamento ao redor de um veículo do tipo sedan ou notchback e a região da esteira formada na parte posterior. A localização da região de separação do escoamento determina o tamanho da região de esteira e, portanto, determina o valor do arrasto aerodinâmico (C_D).

Figura 4 - Fluxo ao redor e região de esteira de um veículo notchback



Fonte: Adaptado de Heisler (2002, p. 616)

A separação da camada-limite ocorre quando o gradiente de pressão faz com que o esforço de cisalhamento na parede (superfície do veículo) se anule, ocorrendo regiões de escoamento reverso e, portanto, à formação da esteira. A localização em que a separação acontece, determina o tamanho da região de recirculação atrás da carroceria do veículo, e assim, o arrasto aerodinâmico.

2.3.2 Coeficiente de sustentação (C_L)

O coeficiente de sustentação (C_L) é a medida da diferença de pressão criada ao redor da carroceria do veículo enquanto se move no fluido, conforme Heisler (2002). Sua formulação é dada pela equação (Fox *et al.*, 2013):

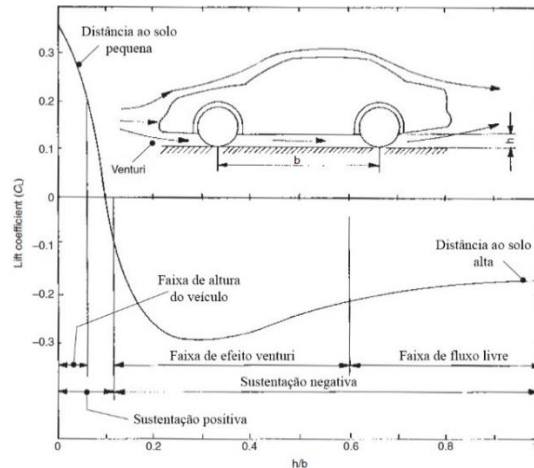
$$C_L = \frac{2F_l}{\rho V^2 A} \quad (7)$$

sendo:

F_l – componente vertical da força de sustentação;

A resultante dessa diferença pode apontar tanto para cima, ocorrendo a sustentação positiva, quanto para baixo, com valor negativo. A sustentação positiva é prejudicial para a estabilidade do veículo, reduzindo a aderência do pneu com a rua, enquanto a sustentação negativa, aumenta a aderência do pneu, fenômeno esse conhecido como downforce. Vários parâmetros geométricos do veículo interferem diretamente nesse coeficiente, como, a altura do veículo em relação ao solo, o efeito Venturi que ocorre entre o assoalho do carro e a rua, a presença ou não de aerofólios e *spoilers*. A figura 3 relaciona os fatores mencionados com valores médios para o coeficiente de sustentação de um veículo notchback.

Figura 5 - Coeficiente de sustentação e fatores de influência



Fonte: Adaptado de Heisler (2002, p. 600)

O coeficiente de sustentação, de forma análoga ao coeficiente de arrasto, é profundamente afetado pela geometria do veículo, ângulo de ataque e pelas características do escoamento. Para veículos, o C_l é priorizado para gerar *downforce*, evitando componentes de forças ascendentes, que afetam diretamente o contato do pneu com o solo, comprometendo a estabilidade veicular (Fox *et al.* 2013).

2.3.3 Coeficiente de pressão (C_P)

O coeficiente de pressão (C_P) representa a distribuição da pressão ao longo das superfícies externas da carroceria do veículo. Ele é uma grandeza adimensional que relaciona a pressão local em um ponto da superfície com a pressão dinâmica do escoamento livre. Sua equação é dada por (White, 2011):

$$C_P = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2}, \quad (8)$$

sendo,

p – pressão estática local na superfície;

p_∞ - pressão estática do escoamento livre;

V_∞ - velocidade do escoamento livre;

A distribuição do coeficiente de pressão é fundamental para a análise aerodinâmica, pois ajuda a identificar pontos de estagnação, que significam regiões

de alta pressão, podendo aumentar a resistência do ar e contribuindo para o aumento do arrasto. Além disso, o coeficiente de pressão está diretamente relacionado à velocidade local do escoamento, onde valores positivos indicam desaceleração do fluxo, resultando em estagnação, valores nulos correspondem a regiões onde a velocidade é igual à do escoamento livre e valores negativos indicam sucção devido ao escoamento acelerado. Dessa forma, o C_p , permite analisar simultaneamente a distribuição da pressão e o comportamento da velocidade ao redor do veículo.

O padrão de distribuição da pressão sobre o veículo depende do seu design, sua velocidade, direção e intensidade do fluido. A figura 4 mostra os pontos de pressão alta/baixa comuns em torno de um veículo *notchback*, sendo possível identificar as regiões onde a velocidade do fluxo é mais lenta, capo e para-brisa dianteiro, gerando uma alta pressão e no porta-malas também, mas com uma magnitude inferior. Já no teto e na região inferior do veículo, é identificado a velocidade maior de escoamento, ocorrendo uma pressão negativa.

Figura 6 - Velocidade relativa do ar e condições de pressão sobre um veículo em movimento



Fonte: Adaptado de Heisler (2002, p. 587)

A análise do coeficiente de pressão é essencial no projeto automotivo, pois fornece informações diretas sobre a distribuição das forças de pressão ao redor da carroceria do veículo, que possibilita otimizar a sua forma para redução do arrasto, controlar a sustentação e compreender a formação da esteira.

2.4 PERDAS DE POTÊNCIA POR ARRASTO

Quando um veículo está em movimento, diversas forças resistivas atuam sobre sua superfície, exigindo maior potência para que sejam superadas. Entre essas forças, as perdas aerodinâmicas por arrasto, tornam-se predominantes à medida que a velocidade aumenta, sendo diretamente influenciadas pela interação entre o escoamento do fluido e a geometria do veículo. Essas perdas são compostas principalmente pelo arrasto de forma e pelo arrasto de fricção.

O arrasto de forma ocorre pela separação do escoamento ao redor do veículo, formando zonas de recirculação na parte posterior, denominada esteira. Essa separação está relacionada diretamente ao C_d e a área frontal. Veículos do tipo *squareback*, como o veículo de estudo, apresentam grande contribuição de arrasto devido a separação abrupta do escoamento e à dificuldade de recuperação da pressão na esteira, gerando uma grande região de recirculação altamente energética e turbulenta, aumentando significativamente o arrasto de forma (Littlewood e Passmore, 2012).

O arrasto de fricção ocorre pela tensão de cisalhamento que age sobre a superfície do objeto em razão da viscosidade do ar. Esse arrasto ocorre na camada limite e como mencionado anteriormente, os efeitos viscosos são relevantes. A intensidade da perda por arrasto de fricção depende da área de contato, da rugosidade superficial e do regime de escoamento (Fox *et al.*, 2013).

2.5 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

A simulação numérica de escoamento ao redor de geometrias complexas, como de veículos, vem se tornando cada vez mais indispensável para a otimização da eficiência energética através da aerodinâmica veicular. As equações de Navier-Stokes (eq. 4) são tridimensionais e não lineares, apresentando regiões de escoamento separado e turbulência que inviabilizam soluções analíticas completas (Fox *et al.*, 2013). Assim, a dinâmica de fluidos computacional resolve as equações governantes por métodos numéricos, discretizando o domínio e as equações em forma diferencial ou integral.

Para que a simulação numérica possua uma solução que converge sendo fidedigna aos fenômenos físicos reais, o processo envolve as seguintes etapas (Fox *et al.*, 2013):

- Geração de malha tridimensional que representa a geometria;
- Escolha do modelo de turbulência (equações de conservação da massa, movimento e energia);
- Aplicação de condições iniciais e de contorno;
- Critérios de convergência baseadas no monitoramento de resíduos;

De acordo com White (2011), é destacado que para escoamento externos, o acerto da malha e a espessura da camada limite é crucial para reproduzir gradientes acentuados, prevenir oscilações numéricas, zonas de separação e as esteiras que dominam a aerodinâmica externa de um veículo.

2.5.1 Métodos dos volumes finitos

O método dos volumes finitos é uma das aplicações numéricas mais empregadas na dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para resolução das equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia em geometrias complexas. Ele consiste em discretizar o domínio computacional em volumes controle (células), sobre os quais são aplicadas as equações em sua forma integral. Esta metodologia possibilita a conservação local e global das propriedades físicas. As variáveis primárias são armazenadas no interior das células, enquanto os fluxos convectivos e difusivos são avaliados nas faces que delimitam cada volume de controle. Essa metodologia permite lidar de maneira consistente com escoamentos compressíveis e incompressíveis e aplicar diretamente condições de contorno em geometrias variáveis (Ferziger e Peric, 2012).

O CFD permite obter as distribuições detalhadas de pressão e tensões superficiais, algo extremamente complexo de avaliar experimentalmente em geometria de veículos. Por fim, o método dos volumes finitos é a base para os principais softwares comerciais, como o Ansys Fluent, Star-CCM e OpenFoam, amplamente utilizados pela indústria automotiva e pesquisada acadêmicas.

2.5.2 Modelos de turbulência

A modelagem matemática de escoamentos turbulentos é reconhecida como um dos problemas mais complexos da dinâmica dos fluidos computacional. A simulação numérica direta (DNS), que resolve todas as escalas temporais e espaciais das equações de Navier-Stokes, estabelece a forma mais completa do fenômeno. Apesar disso, o custo computacional dessa abordagem cresce de forma exponencial com o número de Reynolds, impossibilitando a sua aplicação na maioria das aplicações de engenharia em escoamentos turbulentos (Ferziger e Peric, 2012).

Para que o custo computacional seja contornado, recorre-se às equações de Navier-Stokes com médias de Reynolds (RANS), que possibilita representar os efeitos médios da turbulência sobre o escoamento de maneira computacionalmente acessível. Nesta metodologia, as variáveis de escoamento são decompostas em uma parte média e outra flutuante, introduzindo o tensor de Reynolds, que expressa o transporte da quantidade de movimento devido as flutuações turbulentas, resultando em um sistema de equações não fechado (Blazek, 2005). A solução desse problema necessita a utilização de modelos de turbulência, que fornecem aproximações para as variáveis desconhecidas. Essas aproximações são grandezas como a energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação ou taxa específica de dissipação.

Entre os modelos mais utilizados, destacam-se os modelos de uma equação, como o Spalart-Allmaras, que introduzem uma única variável adicional relacionada à viscosidade turbulenta e modelos de duas equações, que resolvem equações de transporte para a energia cinética turbulenta (k) e para uma medida de dissipação, seja a taxa de dissipação turbulenta (ϵ) ou a taxa específica de dissipação (ω). O modelo híbrido, como o $k - \omega$ SST (Shear Stress Transport ou transporte de tensão de cisalhamento), combina a robustez do modelo $k - \epsilon$ em regiões afastadas da parede com a precisão do modelo $k - \omega$ junto às superfícies sólidas, sendo amplamente empregados em aplicações de engenharia automotiva (Blazek, 2005).

A escolha do modelo de turbulência, deve considerar o regime do escoamento, a geometria de estudo e os objetivos da simulação. Cada modelo apresenta vantagens e limitações específicas, de modo que não há um modelo superior em todas as situações. Para a aerodinâmica veicular, o modelo $k - \omega$ SST tem sido particularmente adequado, pois representa com maior fidelidade a separação e recirculação do escoamento externo sobre carrocerias.

2.5.2.1 Energia cinética turbulenta (k)

A energia cinética turbulenta é uma grandeza fundamental na modelagem de escoamentos turbulentos, pois expressa a intensidade média das flutuações de velocidade em um fluido. Ela representa a fração da energia total do escoamento que está armazenado nos movimentos irregulares e caóticos característicos da turbulência. Sua energia está associada a vórtices de diferentes escalas, que transportam massa, quantidade de movimento e energia de forma não linear ao longo do domínio, nas três direções do campo de escoamento (Blazek, 2005). Em termos matemáticos, por unidade de massa, ela é definida como:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{u'_x u'_x} + \overline{u'_y u'_y} + \overline{u'_z u'_z}), \quad (9)$$

Onde u'_x , u'_y e u'_z são as componentes das variações das flutuações de velocidade em cada direção, ou seja, a intensidade média das oscilações turbulentas.

Nos modelos baseados em RANS, a equação da energia cinética turbulenta k é resolvida em conjunto com uma segunda variável, como a taxa de dissipação ϵ no modelo $k - \epsilon$, ou a frequência específica ω , do modelo $k - \omega$. Embora a definição de k seja universal, a forma como sua equação é modelada varia de acordo com o modelo de turbulência utilizado. Em particular, os termos de dissipação e difusão são representados de maneira diferente em cada abordagem (Blazek, 2005).

2.5.2.2 Modelo de turbulência $k - \epsilon$

O modelo de turbulência $k - \epsilon$ é um dos mais utilizados em CFD para simular escoamentos turbulentos. Como dito anteriormente, o modelo utiliza duas equações, uma para a energia cinética turbulenta e outra para taxa de dissipação turbulenta.

A variável ϵ , representa a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta k é convertida em energia interna devido à ação da viscosidade molecular. Em termos físicos, ela mede a quantidade de energia turbulenta é convertida em calor por unidade de volume e tempo. Enquanto k fornece uma escala de energia para a turbulência, ϵ , fornece a escala de tempo no processo dissipativo. Essa formulação proporciona uma

descrição estatística da turbulência com custo computacional reduzido, permitindo seu amplo uso em problemas de engenharia.

Contudo, o modelo apresenta dificuldades na região próxima às paredes, onde os gradientes de velocidade são muito elevados. Nestes casos, para a resolução direta da camada limite, seria necessária uma malha extremamente fina, o que elevaria o custo computacional significativamente. Para contornar esse problema, é necessário utilizar as funções de parede, que substituem a resolução das equações por correlações baseadas no perfil logarítmico de velocidade (Blazek, 2005).

As equações do modelo $k - \epsilon$ em sua forma diferencial são escritas como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_L + \frac{\mu_T}{\sigma_K} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij}^F S_{ij} - \rho \epsilon \\ \frac{\partial(\rho \epsilon^*)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \epsilon^*) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_L + \frac{\mu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon^*}{\partial x_j} \right] + \\ &+ C_{\epsilon 1} f_{\epsilon 1} \frac{\epsilon^*}{k} \tau_{ij}^F S_{ij} - C_{\epsilon 2} f_{\epsilon 2} \rho \frac{(\epsilon^*)^2}{k} + \varphi_\epsilon \end{aligned} \quad (10)$$

onde,

k , é a energia cinética turbulenta,

ϵ , é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta,

ρ , é a densidade do fluido,

u_i , são as componentes médias da velocidade,

μ , é a viscosidade molecular,

μ_T , é a viscosidade turbulenta,

$\sigma_K, \sigma_\epsilon$, são números de Prandtl turbulentos,

C_{ii} , são as constantes empíricas do modelo,

φ_ϵ , função de parede

Segundo Blazek (2005), este modelo de turbulência é eficiente e apropriado para aplicações de escoamento externo, oferecendo um bom equilíbrio entre custo computacional e precisão. Contudo, apresenta limitações em situações de gradientes de pressão adversos e forte separação do escoamento, onde o uso de funções de parede é altamente questionável, podendo comprometer os resultados.

2.5.2.3 Modelo de turbulência $k - \omega$ SST

O modelo de turbulência $k - \omega$ SST foi desenvolvido para combinar os benefícios do modelo $k - \epsilon$ e $k - \omega$, permitindo superar algumas de suas limitações individuais. Nas regiões próximas à parede, a formulação utilizada é a $k - \omega$, pois apresenta maior precisão na previsão do comportamento do gradiente de cisalhamento na camada-limite e o modelo $k - \epsilon$ nas regiões afastadas, onde garante maior robustez numérica e menor sensibilidade às condições de contorno do escoamento livre (Blazek, 2005).

Além dessa mescla de modelos, o SST acrescenta uma equação para o transporte da tensão de cisalhamento turbulenta. Essa equação limita a superestimação da viscosidade turbulenta e permite prever com maior precisão o ponto de separação da camada-limite. Esse recurso é um item crítico para análise de escoamento externo em geometrias de veículos, que possuem curvatura acentuada e gradientes de pressão adversos (ANSYS, 2024).

As equações diferenciais do modelo, mantém a estrutura das equações de $k - \epsilon$ e $k - \omega$, mas são incluídos termos de correção e função. De maneira simplificada, elas podem ser escritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j k) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_L + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij}^F S_{ij} - \beta^* \rho \omega k \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j \omega) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu_L + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ &+ C_\omega \rho \frac{\mu_T}{k} \tau_{ij}^F S_{ij} - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - f_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (11)$$

E a equação da viscosidade turbulenta é definida como:

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega f_2)} \quad (12)$$

sendo, a_1 uma constante, Ω a vorticidade, f_1, f_2 , as funções de mistura que controlam a transição entre os modelos. Esta equação da viscosidade turbulenta impede que em situações em que há gradientes de pressões adversos na camada-limite, valores

irreais sejam produzidos, tornando o modelo mais confiável em previsões de separação do escoamento (Blazek, 2005).

2.5.3 Índice de convergência da malha (GCI)

Nas simulações numéricas de CFD, a qualidade da malha interfere diretamente na precisão dos resultados. Como a discretização da malha introduz erros no processo de aproximação das equações dos modelos de turbulência, é importante verificar se os resultados permanecem constantes mesmo quando a malha é refinada.

Essa verificação conhecida como teste de independência da malha, assegura que os coeficientes aerodinâmicos de interesse ou a distribuição da pressão, não sejam influenciados pelo tamanho das células da malha. Desta forma, Roach (2009), introduz o índice de convergência da malha (GCI), que é uma ferramenta padronizada para quantificar o erro numérico associado a discretização, fornecendo uma métrica objetiva e comparável entre diferentes estudos.

O cálculo do GCI envolve a comparação direta entre os coeficientes obtidos em malhas de diferentes refinamentos. O erro relativo entre duas malhas é dado por:

$$|\varepsilon| = \frac{f_2 - f_1}{f_1}, \quad (13)$$

onde,

$|\varepsilon|$, é o erro relativo entre duas malhas,

f_1 , é o valor da grandeza avaliada da malha mais fina,

f_2 , é o valor da grandeza avaliada da malha mais grossa.

A partir desse erro, o GCI é calculado através da seguinte equação:

$$GCI = F_s \cdot \frac{|\varepsilon|}{r^{p-1}}, \quad (14)$$

sendo,

F_s , fator de segurança, usualmente adotado como 1,25 para comparação,

$r_{GCI} = \frac{h_2}{h_1}$, razão de refinamento entre as malhas,

p , ordem observada de convergência.

2.5.3.1 Fator de refino entre as malhas (r)

O fator r é utilizado nos estudos de independência da malha para qualificar o refinamento entre duas malhas sucessivas. No cálculo do GCI, o fator é empregado como visto na equação 14, resultando em valores menores que um (Roach, 2009).

Contudo, para utilizar como o fator de refinamento entre malhas, é utilizado a sua forma clássica, apresentada por Roach (1998), que tem a seguinte equação:

$$r_{refino} = \frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{\Delta_1}{\Delta_2}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Onde,

$h \propto \Delta^{-\frac{1}{3}}$, tamanho característico da malha tridimensional,

Δ_1 , número total de células da malha 1 (grossa),

Δ_2 , número total de células da malha 2 (fina).

O autor recomenda que para o uso correto, as malhas apresentem um refinamento sistemático, ou seja, que o valor do fator entre as malhas grossa – média e média – fina deve ser o mesmo. O autor também fala que valores próximos de 1 distorcem o método GCI, pois a diferença entre as malhas é muito pequena, da mesma forma que valores muito altos, próximos a 2 podem criar instabilidades. Por este motivo, o autor recomenda valores de r próximos de 1.3 a 1.4, sendo assim o refinamento suficiente a ponto de não introduzir ruídos e nem causarem instabilidades numéricas.

Desta forma, o fator clássico (equação 15) foi utilizado para determinar o refinamento entre as malhas sucessivas, enquanto o fator invertido foi empregado na equação 14, para somente o cálculo do GCI. Nota-se que as formulações são proporcionais, sendo uma o inverso da outra, apresentando a mesma razão de refinamento, com conveções opostas.

2.6 VEÍCULO ARROW-ONE

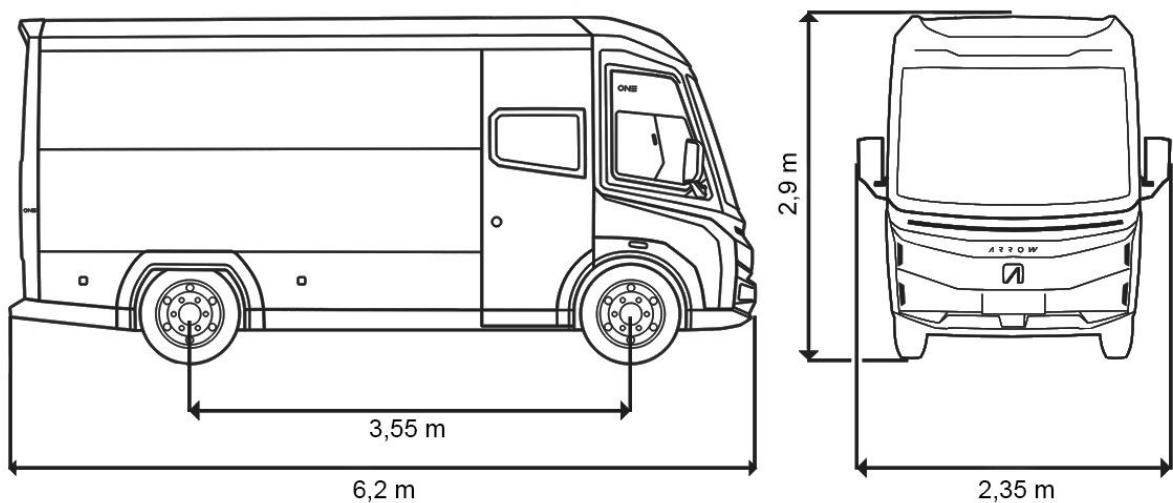
O Arrow One é um veículo utilitário 100% elétrico, com sua geometria concebida para maximizar o transporte logístico em trajetos urbanos e rodoviários com autonomia máxima de 200 km, consumo médio de 0,4 kWh/km e carregamento rápido de 35 min. Possui potência de 183cv e seu peso bruto total é de 5.3ton. Configura-se como um veículo de porte médio com elevada relação entre volume útil e área ocupada, sendo possível carregar até 2000 kg (Arrow Mobility, 2025). A figura 8 apresenta as dimensões totais do veículo, utilizadas nesse estudo.

Figura 7 - Arrow One



Fonte: Adaptado de Arrow Mobility (2025)

Figura 8 - Dimensões gerais Arrow One



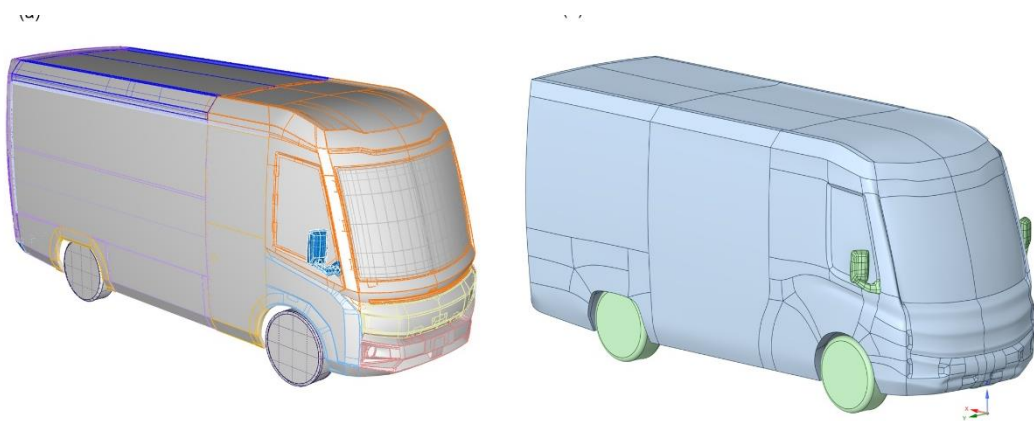
Fonte: Adaptado de Arrow Mobility (2025)

3 METODOLOGIA

3.1 GEOMETRIA DE ESTUDO

A geometria utilizada nas simulações foi desenvolvida a partir do modelo CAD fornecido pela Arrow Mobility. A partir deste modelo, simplificações foram realizadas em sua geometria, a fim de reduzir o custo computacional, sem afetar os fenômenos aerodinâmicos avaliados. Todos os espaçamentos entre as chapas da carroceria, portas, capô e demais componentes foram removidos, e os dutos e as passagens de ar do sistema de arrefecimento das baterias foram fechadas. As rodas foram representadas pela sua dimensão externa, completamente fechadas, sem detalhamento interno ou da banda de rodagem. Todos os componentes da suspensão, eixos e diferenciais foram suprimidos do modelo. Elementos expostos do chassi também foram removidos. Dessa forma, o custo computacional foi reduzido, permitindo a geração de uma malha mais eficiente e adequada para simulação. A figura 9 mostra o comparativo do arquivo original do CAD (a) fornecido pela empresa e o modelo simplificado (b), desenvolvido para o estudo deste trabalho.

Figura 9 - Modelo CAD original (a) e modelo simplificado (b)



Fonte: Autor (2025)

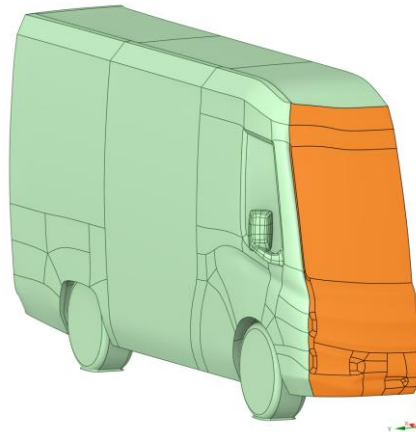
Para que seja possível compreender melhor os efeitos aerodinâmicos que ocorrem no exterior do veículo e suas contribuições para tal, o modelo foi dividido entre as seguintes partes: área frontal, retrovisor, teto, assoalho, rodas e área traseira.

Além disso, para obter mais economia de recurso computacional o veículo foi seccionado ao meio, por se tratar de uma geometria espelhada.

3.1.1 Área frontal

A geometria selecionada da área frontal foi definida conforme a figura 10 mostra. Ela inicia na parte inferior do para-choque e se estende até o final da moldura do para-brisa, onde há o encontro com o início da parte superior do veículo.

Figura 10 - Área frontal

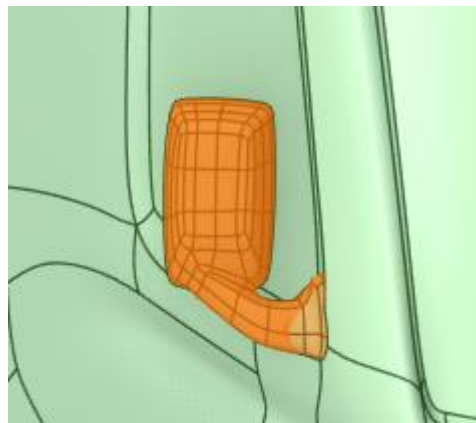


Fonte: Autor (2025)

3.1.2 Retrovisor

O retrovisor foi inteiramente selecionado como uma área de interesse, como a figura 11 mostra.

Figura 11 - Retrovisor

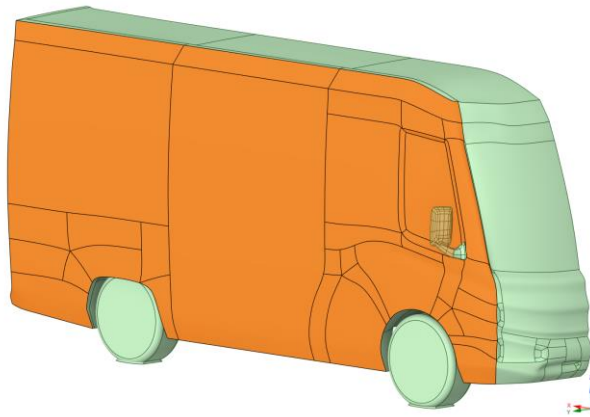


Fonte: Autor (2025)

3.1.3 Área Lateral

A geometria selecionada para a lateral compreende todos os painéis laterais, região da janela e porta. Assim como a área frontal, ela termina com a sua ligação a parte superior e ao encontrar a área frontal definida anteriormente. A figura 12 mostra toda sua região de seleção em laranja.

Figura 12 - Área Lateral

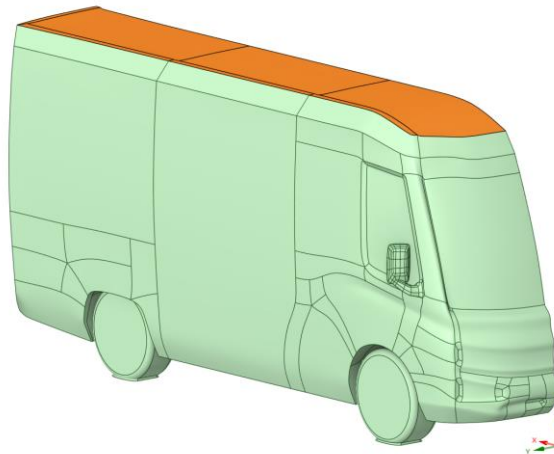


Fonte: Autor (2025)

3.1.4 Área superior

A região superior do veículo foi definida conforme é observado na figura 13. Ela compreende toda região entre o fim da parte frontal e da lateral até a extensão final onde se encontra com a região da traseira.

Figura 13 - Área superior

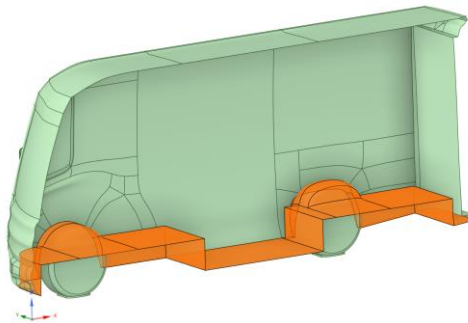


Fonte: Autor (2025)

3.1.5 Assoalho

O assoalho do veículo compreende toda a área inferior da geometria, incluindo os para-barros. Na sua seleção, figura 14, foi seguido o perfil existente, sendo o ressalto central o local correspondente do compartimento das baterias.

Figura 14 - Assoalho

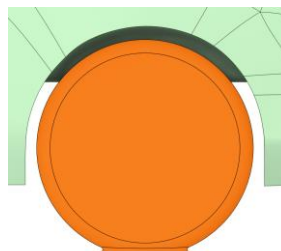


Fonte: Autor (2025)

3.1.6 Rodas

O ponto de contato entre o pneu e o solo requer uma atenção especial, pois se trata de uma região que pode ocasionar dificuldades matemáticas na simulação. Por este motivo, Babu (2019), ressalta que há necessidade de simplificação dessa área, a fim de evitar custos computacionais elevados, sobretudo quando a roda está rotacionando. Para contornar este problema, o autor sugere a utilização de um pequeno raio no contato-solo, que ameniza a geometria, garantindo maior estabilidade numérica. A adoção deste artifício é uma prática comum neste tipo de simulação, sendo amplamente utilizado para viabilizar a modelagem das rodas. A figura 15 ressalta o filete de contato adicionado nas rodas.

Figura 15 – Roda frontal e filete de contato pneu-solo

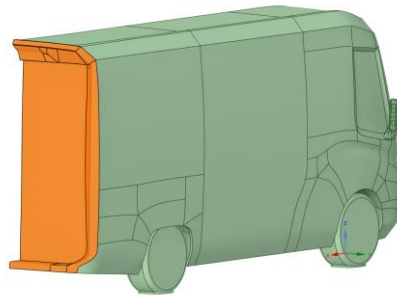


Fonte: Autor (2025)

3.1.7 Área traseira

A área traseira do veículo compreende todas as faces delimitadas pelo término do teto, pela lateral e pela extensão final do assoalho. Na figura 17, é possível visualizar a seleção completa da região.

Figura 16 – Área traseira

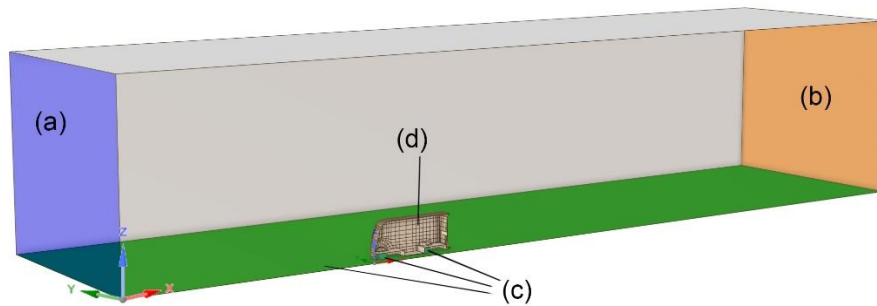


Fonte: Autor (2025)

3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno definem como o escoamento interage com os limites do domínio computacional. De acordo com o Ansys Theory Guide (2024), essas condições podem assumir diferentes propósitos, sendo entradas do escoamento, saídas, superfícies sólidas e condições de simetria. A correta definição das condições de contorno é essencial para garantir a estabilidade numérica e a representatividade dos fenômenos aerodinâmicos da simulação. No presente estudo, as simulações foram realizadas em regime permanente e foram empregadas condições de contorno conforme ilustrado na figura 17, sendo (a) entrada do domínio, (b) saída de pressão, (c) paredes móveis e (d) paredes fixas. As demais fronteiras do domínio foram definidas como simetria.

Figura 17 – Condições de contorno



Fonte: Autor (2025)

3.2.1 Velocidade de escoamento

Para a entrada do domínio, a velocidade de escoamento do fluido foi de 22,22 m/s (80km/h), valor que representa o permitido em trajetos urbano-rodoviário em diversas cidades brasileiras e que as forças aerodinâmicas começam a ser mais influentes sobre a dinâmica do veículo (Gillespie, 1992). Nesta faixa de velocidade, o número de Mach permanece abaixo de 0,3, permitindo adotar a hipótese de escoamento incompressível, uma vez que não ocorrem variações significativas de densidade ou de propriedades térmicas do ar (White, 2011).

3.2.2 Intensidade de turbulência e taxa de viscosidade turbulenta

A intensidade de turbulência adotada foi de 1%, valor compatível com escoamentos externos em regime controlado, como num túnel de vento, como recomendado por Ansys (2024). No guia teórico, recomenda-se que em escoamentos externos a intensidade de turbulência fique entre 0,5% e 1%, enquanto para escoamentos internos o valor pode variar de 5% a 20%.

A taxa de viscosidade turbulenta foi definida como 10, representando uma condição inicial de baixa difusidade turbulenta, como num escoamento externo. Segundo Ansys (2024), os valores usuais para os escoamentos externos variam entre 1 e 10, enquanto escoamentos internos altamente turbulentos podem ser de ordem de grandeza superior.

3.2.3 Paredes móveis

A condição de parede móvel, como o solo em movimento, é fundamental para representar garantir a fidelidade física. Esta característica, evita a formação artificial de camada limite em superfícies que não estão em repouso em relação ao escoamento (Blazek, 2005). Além disso, a definição correta da velocidade da parede é essencial para manter a coerência entre as condições de contorno de entrada e a interação fluido-veículo na região próxima ao solo (Ansys, 2024). Portanto, a velocidade da parede móvel foi definida com a mesma direção e intensidade da condição da entrada do domínio.

Além do solo como parede móvel, as rodas do veículo também são paredes móveis com rotação. De acordo com Hucho (1998), é enfatizado que as rodas em rotação alteram o campo do escoamento sob o veículo, influenciando os coeficientes aerodinâmicos. Logo, as rodas foram definidas como paredes móveis rotacionais com velocidade angular relativa à velocidade linear do escoamento, sendo 55 rad/s.

3.2.4 Paredes fixas

As paredes fixas são trabalhadas como superfícies sólidas, com a condição de não deslizamento. Isso implica que a velocidade do fluido na interface da parede seja nula. Essa condição reflete o comportamento físico real de fluidos viscosos, sendo indispensável para a representação fidedigna dos perfis de velocidade e pressão ao longo da superfície do veículo (Ansys, 2024). Assim, as superfícies internas do veículo foram definidas como paredes fixas.

3.2.5 Simetria

Para a condição de simetria, foram selecionadas as faces do túnel de vento e do veículo que são cortadas pelo plano XZ, conforme visto na figura 18. Além disso, as paredes externas do domínio também foram definidas como simetria, pois de acordo com Ansys (2024), quando se há um domínio suficientemente grande, a condição de simetria pode ser usada como aproximação do escoamento livre.

3.2.6 Modelo de turbulência

Com o objetivo de uma avaliação preliminar da malha e verificar a estabilidade numérica da simulação, foi utilizado o modelo $k - \epsilon$ *realizable*, seguindo as diretrizes disponíveis no guia teórico do Ansys (2024). Entretanto, conforme a malha foi sendo refinada, foi definido que seria utilizado o modelo de turbulência $k - \omega$ SST, que segundo Blazek (2005) reproduz com desempenho superior a previsão de separação do escoamento e gradientes adversos de pressão. O guia teórico do Fluent (Ansys, 2024) também recomenda o uso deste modelo de turbulência para escoamentos externos com separação, por sua estratégia híbrida e robustez em camadas limites.

3.2.7 Valores de referência

Os valores de referência utilizados para a simulação são dados e parâmetros para o cálculo base dos coeficientes de interesse e do número de Reynolds. Eles não possuem influência na convergência da simulação, mas definem como os resultados desses coeficientes serão apresentados nos relatórios emitidos pelo software (Ansys, 2024). A figura 18 apresenta os valores utilizados para todas as simulações realizadas para este estudo com os dados de acordo com os requisitos da simulação.

Figura 18 – Valores de referência

Parameter	Value
Area [m ²]	2.731533
Density [kg/m ³]	1.224999
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	1
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	288.16
Velocity [m/s]	22.21999
Viscosity [kg/(m s)]	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

Fonte: Autor (2025)

3.3 CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

Para considerar que a simulação esteja convergida, alguns critérios chave são necessários. De acordo com Celik et al. (2008), a convergência pode ser considerada

alcançada após a redução de três ordens de magnitude da continuidade, sendo preferencialmente quatro. Já no Ansys Fluent User Guide (2025), é explicado que os resíduos são dependentes da inicialização do solver e que valores de 10^{-3} a 10^{-4} de continuidade não necessariamente garantem a convergência. Assim, o guia recomenda a análise do comportamento residual junto com a estabilização das grandezas físicas monitoradas, que devem permanecer estáveis por várias iterações.

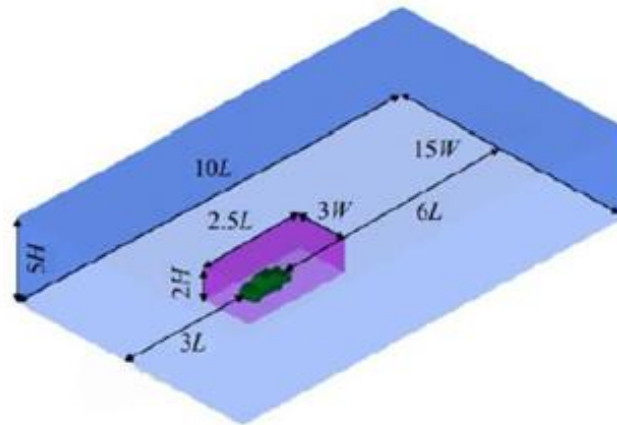
Portanto, neste estudo, foi adotado como critério de convergência a redução do resíduo da continuidade para valores inferiores a 10^{-4} juntamente com o monitoramento do comportamento dos coeficientes aerodinâmicos analisados. Complementarmente, foram observados critérios adicionais como a análise da velocidade em um ponto localizado na esteira e o monitoramento do balanço de massa na saída do domínio, como auxílio para a confiabilidade da convergência.

3.4 DESENVOLVIMENTO DA MALHA

3.4.1 Domínio computacional

A partir da geometria simplificada, definiu-se o túnel de vento com base nas dimensões de referência apresentadas por Zhou et al (2019), conforme ilustrado na figura 18. Um aspecto importante para o dimensionamento adequado do domínio computacional é a razão de bloqueio, definida como a razão entre a área frontal do veículo e a área da seção transversal do túnel de vento. De acordo com Barlow et al. (1999), esse parâmetro não deve ultrapassar a média de 7,5%, uma vez que valores superiores comprometem a representatividade dos resultados. A manutenção da razão de bloqueio é essencial para evitar a aceleração artificial do escoamento ao redor do corpo, fenômeno que pode distorcer a distribuição de pressões e, conseqüentemente, comprometer os resultados do estudo. Dessa forma, assegurar uma razão de bloqueio inferior ao limite recomendado constitui uma condição necessária para a confiabilidade e validade numérica da simulação aerodinâmica. O dimensionamento do túnel de vento proposto por Zhou et al. (2019) se demonstrou ser adequado para manter a razão de bloqueio em níveis reduzidos. Contudo, por se tratar de outro veículo de estudo, com área frontal projetada distinta, o cálculo da razão deve ser feito para validação, garantindo assim um valor abaixo de 7,5%.

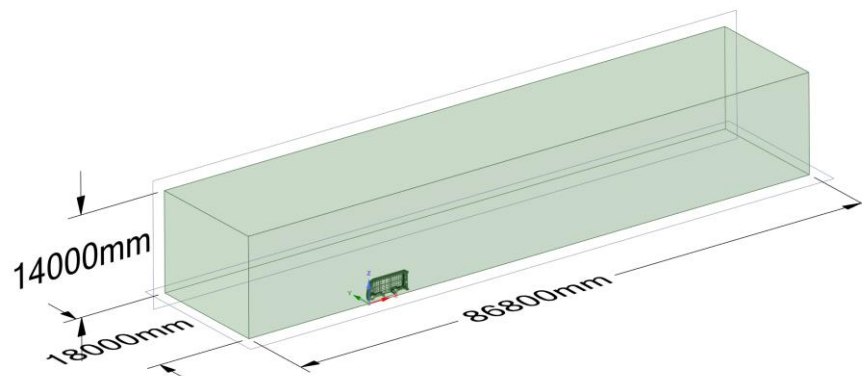
Figura 19 – Dimensões para o túnel de vento



Fonte: Zhou et al. (2019)

As dimensões do túnel de vento foram calculadas a partir do comprimento total do veículo, sendo 3 vezes o comprimento a frente, 6 vezes para trás, 7,5 vezes a largura do modelo para a lateral e 5 vezes para cima. Esse dimensionamento, busca assegurar que o escoamento se desenvolva adequadamente antes de atingir o modelo, que haja espaço suficiente para a dissipação da esteira turbulenta a jusante e que as paredes laterais e superiores não provoquem confinamento excessivo do escoamento (Zhou et al. 2019). Na figura 20 é observado o túnel de vento gerado e suas principais dimensões, conforme especificado anteriormente. Apesar do recomendado ser $10L$ para o comprimento total, no modelo em estudo foi adicionado 20 m a mais para evitar fenômeno identificado como backflow e será discutido na próxima sessão deste trabalho. A razão de bloqueio calculada foi de 1,08%.

Figura 20 – Dimensões do túnel de vento



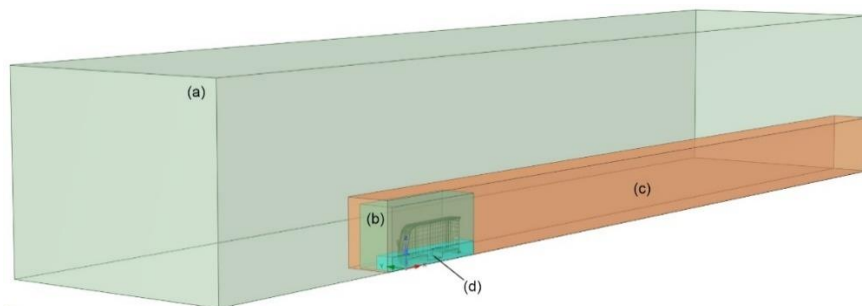
Fonte: Autor (2025)

3.4.2 Corpos de influência

Além do domínio computacional necessitar ser amplo o suficiente para evitar os problemas de confinamento do escoamento, é necessário definir regiões de influência, ou corpos de influência, mais próximos ao veículo e esteira, onde há necessidade de se ter uma malha mais fina. Essas regiões possuem características de grandes gradientes de pressão e a separação do escoamento. Lanfrit (2005) recomenda a utilização de uma caixa interna ao redor do veículo, se estendendo cerca de meia vez comprimento do carro a frente, para os lados e para cima, e uma vez o comprimento do carro a jusante abrangendo a esteira. Zhou et al. (2019) também apresenta uma abordagem semelhante, propondo um domínio computacional em duas escalas: o túnel de vento em azul e o domínio de influência em roxo, conforme ilustrado na figura 19.

O uso de corpos de influência é recomendado pelo manual do software Fluent (2024), pois permite controlar de maneira mais precisa o refinamento da malha, e assim, melhorar a representação dos fenômenos aerodinâmicos. No presente trabalho, foram utilizadas três caixas internas: uma envolvendo diretamente o veículo, outra que se estende até o final do túnel de vento, de modo a capturar integralmente a esteira formada. e uma terceira, na parte inferior do veículo, para refinar melhor as áreas de turbulência gerada pelas rodas e assoalho. A adoção desses corpos de influência contribui para a obtenção de resultados mais consistentes dos coeficientes aerodinâmicos, sobretudo no arrasto associado as regiões de separação do fluxo. Os corpos de influência podem ser observados na figura 19, sendo o túnel de vento (a), a caixa interna ao redor do veículo (b), a segunda caixa interna ao redor da esteira (c) e a caixa interna ao redor do assoalho e rodas (d).

Figura 21 – Corpos de influência



Fonte: Autor (2025)

3.4.3 Elementos de malha

A escolha adequada dos elementos de malha é determinante para a qualidade e eficiência da simulação CFD. O domínio computacional é dividido em pequenos volumes de controle, chamados de células, que podem ser formados por elementos hexaédricos e poliédricos, dependendo da estratégia de refino utilizada. Assim, o Ansys Fluent introduziu uma nova tecnologia, denominada ANSYS Mosaic, que permite a combinação automática de diferentes tipos de malha, conectando regiões de elementos hexaédricos no núcleo do domínio com prismas na camada limite e elementos poliédricos na transição. Essa configuração híbrida possibilita reduzir o número total de elementos, diminuir o tempo de processamento e preservar a acurácia dos resultados (Ansys Inc, s.d.). Além disso, Lanfrit (2005) sugere o uso de malhas híbridas, com prismas extrudidos na camada limite para representar adequadamente os efeitos viscosos e tetraédricos ou hexaédricos no restante do domínio. O autor também destaca a importância de critérios de qualidade como *skewness* reduzido e taxa de crescimento dos elementos suavizada, a fim de assegurar os coeficientes aerodinâmicos mais consistentemente.

Os elementos hexaédricos são particularmente indicados para regiões com escoamento predominantemente regular. Eles apresentam maior estabilidade numérica e menor difusão, em comparação com outros tipos de elementos (Anderson, 2017). Zhou et al. (2019), empregam os elementos hexaédricos no domínio externo ao redor do objeto de estudo, destacando que essa escolha permite reduzir o número de células e assim diminuir o custo computacional, uma vez que, a malha dessa região não tem grande influência direta sobre o escoamento ao redor do veículo.

Os elementos poliédricos são amplamente utilizados em geometrias com alta complexidade, pois permitem maior flexibilidade e capacidade de adaptação as superfícies. Em comparação com elementos do tipo tetraédricos, eles necessitam de um menor número de células para representar o mesmo domínio, possuem mais vizinhos por célula, favorecendo a aproximação dos gradientes. Essas características resultam em benefícios como redução do uso de memória e tempo de processamento, mas também trazem algumas desvantagens, já que o maior número de faces por elemento ocasiona o aumento do custo computacional por célula (Ansys Inc, s. d.). Ainda de acordo com o documento informativo, os resultados reportados mostram uma redução de até 46% no número de elementos, menor uso de memória RAM e

tempo de convergência da simulação até 50% mais rápido quando comparado com malhas tradicionais.

A camada de prismas é fundamental para a correta representação da camada limite, onde os efeitos viscosos são predominantes. Ela é construída pela extrusão dos elementos da superfície em direção normal à parede, formando prismas que se alinham ao escoamento. Desta forma, é possível capturar com maior precisão o gradiente de velocidades e prever fenômenos como a separação do escoamento. De acordo com Leap Australia (2025), a qualidade da resolução depende da altura da primeira célula e do número de camadas prismáticas, parâmetros diretamente relacionados ao valor adimensional y^+ .

3.4.4 Tratamento de parede

O tratamento de parede é um aspecto crítico nas simulações, pois de acordo com o modelo de turbulência selecionado, os resultados dos coeficientes aerodinâmicos são diretamente influenciados. É nesta região que ocorrem os grandes gradientes de velocidade e onde a dissipação de energia turbulenta é mais intensa (Blazek, 2005). Para avaliar a qualidade da malha nessa região, se utiliza o parametro adimensional y^+ , que pode ser definido como:

$$y^+ = \frac{u_{\tau}y}{\nu}, \quad (16)$$

sendo,

u_{τ} , a velocidade de atrito (m/s),

y , a distância normal do centroide da primeira célula a parede (m),

ν , é a viscosidade cinemática (m²/s).

Segundo o Ansys Fluent Theory Guide (2024), existem duas abordagens principais para o tratamento de parede:

- Formulação de baixo Reynolds: é utilizada quando o primeiro ponto da malha está localizado dentro da subcamada viscosa, região de $y^+ \approx 1$. Assim, esta prática garante maior precisão nas forças aerodinâmicas, pois no modelo de turbulência $k - \omega$ SST, a camada limite é resolvida diretamente.

- Formulação de alto Reynolds: é utilizada em regiões da malha em que a primeira célula está na região logarítmica $30 < y^+ < 300$, portanto leis de parede são ativadas para representar o perfil de velocidade.

Ainda de acordo com o guia teórico do Fluent, para lidar com situações em que não é possível garantir $y^+ \approx 1$, foram desenvolvidas formulações denominadas tratamento de parede insensitivo, que realizam uma transição suave entre as abordagens de baixo e alto Reynolds, reduzindo a dependência dos resultados da malha próxima a parede, aumentando a robustez e a confiabilidade da simulação.

3.4.5 Estimativa da primeira célula y

Para estimar o tamanho da primeira célula (y), é necessário que seja especificado qual a meta a ser atingida, $y^+ \approx 1$, ou $30 < y^+ < 300$, de acordo com as condições do escoamento e modelo de turbulência escolhido. A altura da primeira célula adjacente a parede depende do parâmetro adimensional y^+ , de acordo com a equação 17. Rearranjando a equação com y^+ , temos:

$$y = \frac{y^+ \nu}{u_\tau}, \quad (17)$$

A velocidade de fricção de atrito u_τ , é dada por:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (18)$$

E a tensão de cisalhamento τ_w é definida como:

$$\tau_w = \frac{C_f \rho V^2}{2} \quad (19)$$

O C_f , coeficiente de atrito médio é estimado pela correlação de Blasius para o escoamento turbulento:

$$C_f = 0,058 Re^{-0,2} \quad (20)$$

E por último é estimado o valor de Reynolds de acordo com a equação 5. Essa metodologia de cálculo é demonstrada por Blazek (2005).

Realizando todos os cálculos para a velocidade da condição de contorno de entrada de 22,22 m/s, densidade do ar em 1,2754 kg/m³, viscosidade dinâmica de 1,81·10⁻⁵ Pa·s e o comprimento do veículo em 6,2 m, o valor de Re fica em:

$$Re = \frac{1,2754 \times 22,22 \times 6,2}{1,81 \times 10^{-5}} \approx 9,71 \times 10^6, \quad (21)$$

Logo, o coeficiente de atrito médio é calculado:

$$C_f = 0,058 \times (9,71 \times 10^6)^{-0,2} \approx 2,32 \times 10^{-3}, \quad (22)$$

A tensão de cisalhamento na parede:

$$\tau_w = \frac{2,32 \times 10^{-3} \times 1,2754 \times (22,22)^2}{2} \approx 0,731 \text{ Pa}, \quad (23)$$

A velocidade de fricção de atrito

$$u_\tau = \sqrt{\frac{0,731}{1,2754}} \approx 0,757 \text{ m/s}, \quad (24)$$

A viscosidade cinemática é calculada:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1,81 \times 10^{-5}}{1,2754} \approx 1,419 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}, \quad (25)$$

E por fim, substituindo todos os dados na equação 16, temos que para $y^+ = 1$,

$$y = \frac{1 \times 1,419 \times 10^{-5}}{0,757} \approx 1,87 \times 10^{-5} \text{ m} = 0,0187 \text{ mm} \quad (26)$$

Refazendo todos os cálculos para a meta de $y^+ = 30$, obtém-se o valor de:

$$y = \frac{30 \times 1,419 \times 10^{-5}}{0,757} = 5,62 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,562 \text{ mm} \quad (27)$$

3.4.6 Número de camadas prismáticas

A estimativa da quantidade de camadas prismáticas é essencial para se obter o perfil de velocidade correto existente na camada-limite. Para o seu cálculo, é realizado a simplificação da geometria para placa plana, com critério de $Re = 5 \times 10^5$, escoamento turbulento, a utilização da solução integral da equação da quantidade de movimento para poder estimar a espessura da camada-limite e o perfil de velocidade

de 1/7 como aproximação para a camada limite turbulenta (Fox et al, 2013). Portanto a equação da espessura é dada pela relação empírica:

$$\delta(x) = 0,382 x Re_x^{-1/5} \quad (28)$$

E substituindo com os valores já apresentados e realizando os cálculos:

$$\delta = 0,382 \times 1,22 \times (1,91 \times 10^6)^{-1/5} \approx 0,0258 \text{ m} = 25,8 \text{ mm} \quad (29)$$

Para se obter o número de camadas prismáticas que cobrem a espessura calculada na equação 28, resolvendo para o critério de $y^+ = 1$, fator de crescimento de 1,272 e primeira camada de $1,87 \times 10^{-5} \text{ m}$, utiliza-se a progressão geométrica:

$$\delta = a_1 \frac{r^n - 1}{r - 1}, \quad (30)$$

onde, a_1 é a primeira camada, r o fator de crescimento e n o número de camadas. Isolando o n , obtém-se a equação 30

$$n = \frac{\ln\left(1 + \frac{\delta(r-1)}{a_1}\right)}{\ln(r)}, \quad (31)$$

Substituindo os valores, o cálculo é dado por:

$$n = \frac{\ln\left(1 + \frac{0,0258(1,272-1)}{1,87 \times 10^{-5}}\right)}{\ln(1,272)} \approx 24,6, \quad (32)$$

arredondando para cima, o número para $y^+ = 1$ é de aproximadamente 25 camadas prismáticas. De maneira análoga, realizando os cálculos para a condição de $30 < y^+ < 300$, se obtém o valor de aproximadamente 10 camadas prismáticas, sendo o alvo escolhido para o presente estudo.

3.4.7 Refinos de curvatura

Para garantir que todas as curvas da geometria do veículo fossem representadas com fidelidade na malha, no guia teórico do Ansys Fluent (2024) é recomendado que seja utilizado o refino por curvatura com o ângulo 18° , conseguindo capturar a maioria da geometria sem gerar um número excessivo de elementos. Lanfrit (2005) também recomenda a utilização deste refinamento, de maneira automática e com o mesmo ângulo limite, para que a malha se adapte de maneira correta e não

fique facetada. Desta forma foi utilizado o refino por curvatura com ângulo limite de 18° as superfícies do veículo e rodas.

3.5 AVALIAÇÃO DAS MALHAS GERADAS

A avaliação da malha constitui uma etapa essencial em simulações CFD, uma vez que a discretização do domínio computacional inadequada pode comprometer a fidelidade dos resultados. Neste trabalho, a estratégia para tal foi fundamentada no estudo de Gutierrez et al. (2020), que realizou testes de independência de malha e de domínio computacional, estabelecendo critérios quantitativos para assegurar que os coeficientes obtidos não seriam influenciados pelo número de elementos ou pelas dimensões do domínio.

A abordagem dos autores consistiu em gerar diferentes configurações de malha, variando seu refino, número total de células e avaliando o impacto dos coeficientes aerodinâmicos. No artigo, foi demonstrado que, a partir de 5,4 milhões de elementos, as diferenças nos coeficientes de arrasto entre malhas consecutivas ficaram na ordem de 1%, critério adotado como indicativo de independência da malha. Além disso, os autores também avaliaram indicadores métricos da qualidade das células, com o skewness, ortogonalidade e aspect ratio. O guia teórico do Ansys Fluent (2024) classifica valores de skewness inferiores a 0,25 como excelentes, entre 0,25 e 0,5 como bons, entre 0,5 e 0,75 como aceitáveis, e acima de 0,9 como ruins, podendo comprometer a estabilidade numérica. Para ortogonalidade, valores próximos de 1,0 são ideais, sendo recomendável manter a média acima de 0,7. Já para o aspect ratio, pode chegar ao máximo recomendado de 100, em regiões de parede do domínio. Esses limites foram utilizados como referência neste trabalho para validar a qualidade das malhas geradas, em complemento ao critério de independência de malha definidos.

Assim, a estratégia de avaliação da malha foi definida a partir da análise de independência de malha (< 1% de variação nos coeficientes), por meio da comparação do número total de células e da variação percentual dos coeficientes aerodinâmicos e análise da qualidade geométrica, utilizando skewness como métrica primária de distorção dos elementos. De forma complementar, foi utilizado o GCI, que fornece uma métrica padronizada e quantitativa do erro numérico, permitindo comparar diferentes níveis de refinamento de forma objetiva. Para o critério de refino

entre as malhas geradas, o fator r (ver equação 14), foi definido entre 1.2 e 1.5. Esta faixa de valores vai de acordo com o que Celik et al. (2008) recomenda, pois equilibra o custo computacional e a convergência assintomática.

Para que a comparação seja realizada de maneira coerente, os parâmetros de geração da malha foram mantidos constantes, alterando somente o tamanho dos elementos, conforme apresentado na tabela 1. Essa prática está em conformidade com as recomendações do guia teórico do Ansys (2024). Dessa forma, a análise é realizada de maneira objetiva e comparável, isolando o efeito do refinamento no número de células, skewness e coeficientes aerodinâmicos.

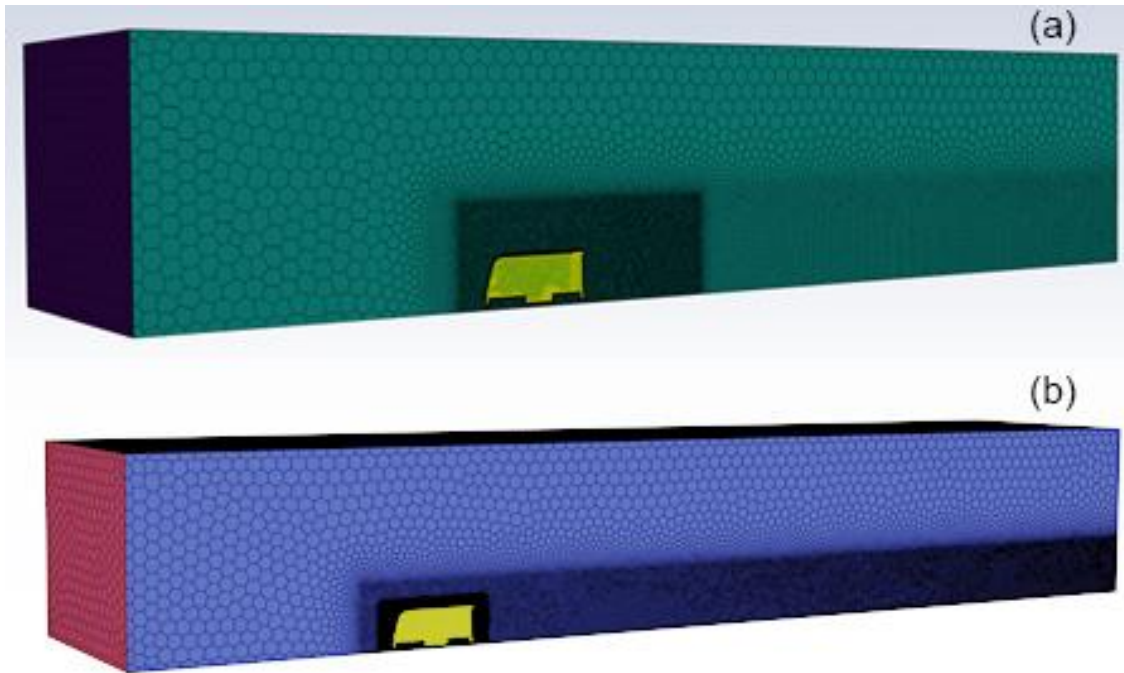
Tabela 1 – Configuração das malhas geradas

Malha	Tamanho máximo dos corpos de influência (mm)			Tamanho da malha de superfície (mm)		Tamanho da malha volumétrica (mm)		Células	Skewness (max)	Fator r
	Corpo B	Corpo C	Corpo D	Min	Max	Min	Max			
1	64	256	32	32	1024	24	1024	1303177	0.57	-
2	56	256	24	24	1024	24	1024	2691775	0.57	1.27
3	32	128	24	12	1024	12	512	5790893	0.56	1.29
4	24	120	16	4	512	2	512	12241506	0.57	1.28
5	16	118	8	2	512	2	512	25343793	0.56	1.27

Fonte: Autor (2025)

Em todas as configurações de malha, foram mantidas constantes os parâmetros de refino por curvatura, fixado em 18° , a camada limite com 10 camadas prismáticas, visando atingir valores adequados de y^+ para uso correto das funções de parede. A figura 22 a seguir permite visualizar o refino implementado, comparando visualmente a malha 1 (a), grosseira, com a malha 5 mais refinada (b). Percebe-se a diferença do tamanho dos elementos visualmente, além da quantidade significativa maior na última malha, visto pela concentração maior nos corpos de influência.

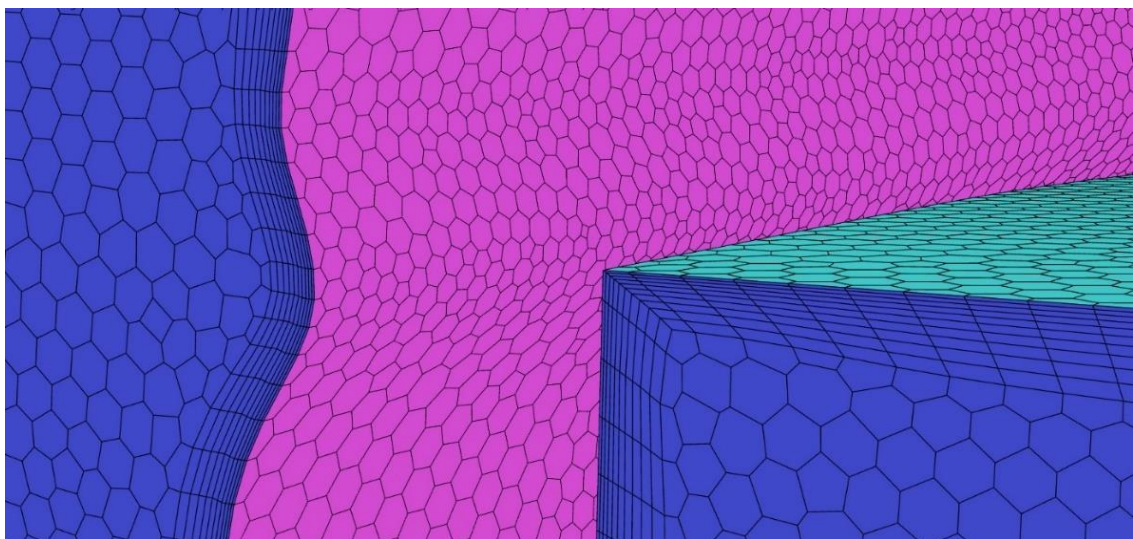
Figura 22 – Comparação entre malhas



Fonte: Autor (2025)

A figura 23 apresenta a configuração das 10 camadas prismáticas, conforme o critério estabelecido anteriormente. No detalhe, é identificado a parte frontal do veículo, (rosa), assim como o detalhe das camadas contornando o assoalho (ciano).

Figura 23 – Camadas Prismáticas



Fonte: Autor (2025)

3.6 RECURSOS COMPUTACIONAIS

Os recursos computacionais disponíveis para a realização deste estudo foi um computador com o processador AMD Ryzen 9 5900X de 12 núcleos e 24 *threads* e 64gb de memória RAM. Também foi utilizado o processamento paralelo em uma GPU, através da NVIDIA RTX 3070 com 8gb de VRAM presente na máquina. Todas as simulações foram realizadas no software Ansys Fluent 2025 R02.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nas simulações, discussões sobre avaliação das malhas, resíduos de convergência, identificação de áreas críticas e análise dos coeficientes aerodinâmicos de interesse. Ao final foi desenvolvido um estudo sobre a potência de arrasto e seu efeito sobre o consumo energético do veículo.

Os valores apresentados neste capítulo correspondem a média das últimas 500 iterações, após os resíduos caírem para a faixa de 10^{-4} e a velocidade do ponto de esteira e razão de massas do sistema terem estabilizado. Essa prática garante maior estabilidade numérica e reduz as flutuações do solver.

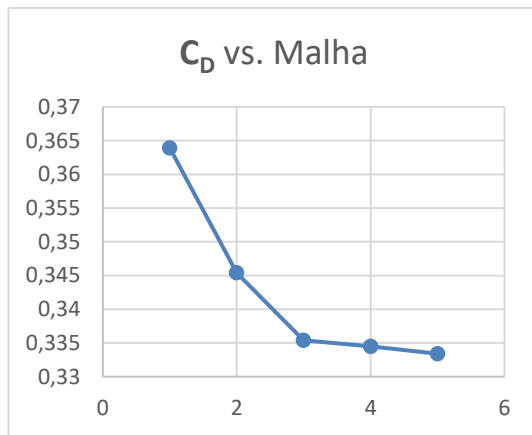
4.1 AVALIAÇÃO DAS MALHAS GERADAS – GCI

A avaliação das malhas foi realizada pelo GCI, para a verificação a consistência das soluções numéricas e verificar se os refinamentos utilizados foram suficientes para garantir a independência dos resultados em relação a malha. Para isso, foram avaliados os números de elementos da malha, razão de refino e os coeficientes aerodinâmicos, como arrasto, sustentação e momento de arfagem. A respeito da última malha desenvolvida, 5, nota-se que foi o limite de refinamento possível de acordo com o hardware disponível. Os valores totais de cada simulação podem ser observados na tabela 3 a seguir juntamente com o erro relativo à malha anterior.

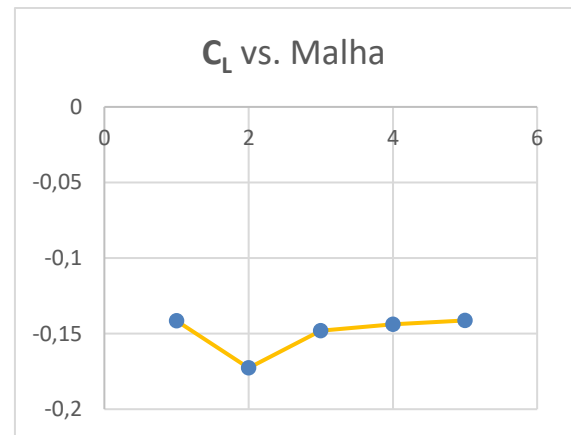
Tabela 2 – Resultado das malhas

Malha	F_d (N)	C_D	$ \epsilon C_D$ (%)	F_L (N)	C_L	$ \epsilon C_L$ (%)	C_m	$ \epsilon C_M$ (%)
1	300,59	0,3639	-	-116,88	-0,1415	-	0,0851	-
2	285,32	0,3454	5,35	-142,68	-0,17273	18,08	0,0938	9,28
3	277,02	0,3354	3,00	-122,36	-0,14813	16,61	0,0863	8,69
4	276,33	0,3345	0,25	-118,81	-0,14383	2,99	0,0850	1,53
5	275,36	0,3334	0,35	-116,70	-0,14128	1,81	0,0861	1,27

Fonte: Autor (2025)

Gráfico 1 - C_D Vs. Malha

Fonte: Autor (2025)

Gráfico 2 – C_L Vs. Malha

Fonte: Autor (2025)

A partir da análise da tabela 2 e visualização dos gráficos 1 e 2, é possível identificar a evolução dos coeficientes com o refinamento da malha. É nítido que conforme o refinamento da malha avança, há uma tendência de convergência dos resultados. Observa-se que a diminuição progressiva dos erros relativos ocorre de maneira assintótica, confirmando que as malhas seguem a mesma metodologia apresentada no capítulo anterior. Um ponto importante a se observar é que apesar do coeficiente de arrasto já atender o critério estabelecido de variação menor que 1%, a sustentação e o momento ainda seguem superiores, indicando uma maior sensibilidade ao refino.

De acordo com os valores apresentados, foi calculado o GCI de cada coeficiente para estimar a incerteza numérica entre cada malha consecutiva. O procedimento utilizado segue como descrito no item 2.5.3, com o fator de segurança $F_s = 1,25$ e ordem aparente $p = 2$. Estes valores são indicados por Celik et al. (2008) para serem utilizados quando as soluções apresentam comportamento estável, sem

divergências ou oscilações numéricas consideráveis. Os resultados dos cálculos são mostrados na tabela 4 a seguir.

Tabela 3 – Comparação do GCI e Incerteza entre as malhas

Grandeza	Malhas				
	1	2	3	4	5
C_D	0,3639	0,3454	0,3354	0,3345	0,3334
GCI (%)	-	10,76	5,62	0,48	0,71
Incerteza	-	0,0372	0,0189	0,0016	0,0024
Intervalo	-	[0,3083 ; 0,3826]	[0,3165 ; 0,3542]	[0,3329 ; 0,3361]	[0,3310 ; 0,3357]
C_L	-0,1415	-0,1727	-0,1481	-0,1438	-0,1413
GCI (%)	-	36,35	31,15	5,77	3,68
Incerteza	-	0,0628	0,0461	0,0083	0,0052
Intervalo	-	[-0,2355 ; -0,1100]	[-0,1943 ; -0,1020]	[-0,1521 ; -0,1355]	[-0,1465 ; -0,1361]
C_m	0,0851	0,0938	0,0863	0,085	0,0861
GCI (%)	-	18,64	16,3	2,95	2,58
Incerteza	-	0,0175	0,0141	0,0025	0,0022
Intervalo	-	[0,0763 ; 0,1113]	[0,0722 ; 0,1004]	[0,0825 ; 0,0875]	[0,0839 ; 0,0883]

Fonte: Autor (2025)

O coeficiente de arrasto (C_D) possui uma redução sem grandes oscilações para cada refino de malha implementado. Ao analisar o seu respectivo GCI, percebe-se uma redução acentuada entre os pares de malha 1→2 e 2→3 e convergência entre os pares seguintes, mostrando que o C_D já atingiu a estabilidade e se encontra independente a partir da malha 4, com o GCI abaixo de 1%.

Para o coeficiente de sustentação (C_L), percebe-se uma maior sensibilidade ao refinamento das malhas. A variação do seu GCI apresenta valores elevados, como 36,35% e 31,15%, mostrando forte dependência da malha. No entanto, a partir da malha 4, ocorre uma redução considerável de sua variação, reforçando que o refinamento aplicado está progredindo para a sua estabilização. A malha 5 apresenta os resultados com menor incerteza numérica, mas que o seu GCI ainda se encontra fora do critério de variação definido, ressaltando o quanto é sensível ao refinamento da malha e a variações do campo de escoamento.

O coeficiente de momento (C_m) exibe comportamento similar ao C_L . Ao verificar os GCIs iniciais, nota-se que são elevados e reduzem significativamente nas malhas mais finas. Apesar de apresentar variação percentual baixa do GCI da malha 5, o valor

ainda se encontra fora do critério para a independência da malha, mostrando ser igualmente sensível a alterações no escoamento como o coeficiente de sustentação.

De forma geral, os resultados apresentados mostram que apenas o coeficiente de arrasto atingiu a independência da malha, enquanto os demais coeficientes exigem malhas mais finas para estabilizar. Caso fosse necessário gerar uma nova sexta malha, seguindo os padrões estabelecidos de refino, ela precisaria possuir cerca de 53 milhões de células para manter o padrão de refino em 1,27, algo inviável pela limitação de memória RAM disponível.

Em virtude disso, a malha 5 foi selecionada como solução final do estudo, pois constitui a malha mais refinada possível dentro das limitações computacionais, e por apresentar a menor incerteza global entre as malhas avaliadas. Apesar das variações observadas para o C_L e C_m , a independência numérica do C_D é suficiente para a avaliação dos resultados, pois somente ela está associada diretamente a força resistiva ao movimento e a potência requerida para deslocar o veículo. Portanto, a convergência obtida para o C_D é suficiente para garantir a confiabilidade da análise do escoamento do veículo. Para concluir a análise, foi verificado o parâmetro y^+ próximo as paredes do veículo, com média final de 39,72, sendo adequado para o uso do modelo de turbulência escolhido com funções de parede, o que reforça a consistência da malha para o estudo.

4.2 ANÁLISE DE RESÍDUOS

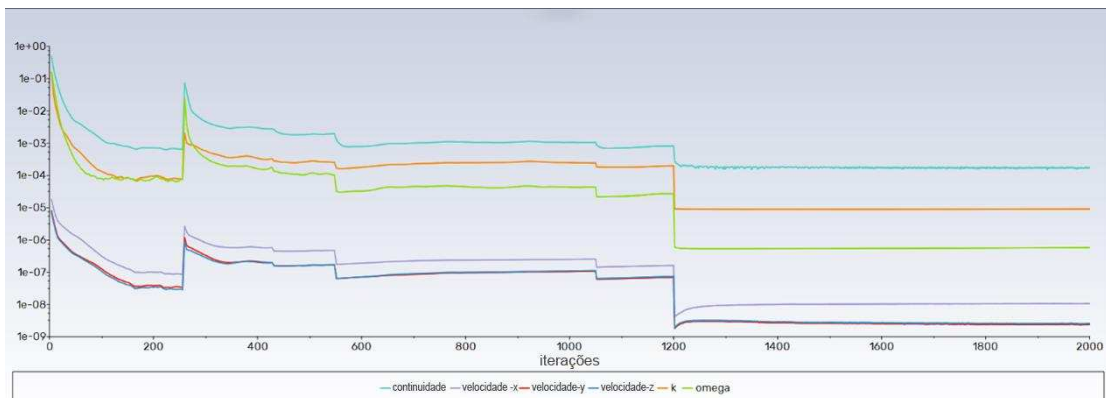
O desenvolvimento dos resíduos da malha final é mostrado na figura 24. Primeiramente, o solver foi inicializado com o tipo híbrido e, posteriormente, foi realizado o processo de FMG (Full Multigrid ou Multi-grade Completa). Esse método consiste em um processo de inicialização que calcula valores iniciais mais precisos, melhorando a convergência do sistema (Ansys, 2024). Após esta etapa, o solver inicia o cálculo da solução em primeira ordem, que esclarece a queda brusca dos resíduos até sua estabilização, pois ocorre a adaptação inicial de todo sistema.

O primeiro degrau percebido no gráfico é proveniente da troca dos métodos de solução, de primeira para segunda ordem, das equações de pressão, momento, turbulência e dissipação da energia cinética, referentes as equações do modelo $k - \omega$. Ao identificar estabilização na queda dos resíduos de continuidade e variação baixa dos demais coeficientes, foi realizado um ajuste da estratégia de convergência,

amortecendo o fator TSF (time scale fator). O TSF é responsável por controlar o tamanho do espaço de tempo fictício na simulação e influencia diretamente a solução. Valores altos de TSF aceleram a convergência da simulação enquanto valores baixos melhoram a estabilidade, diminuindo os resíduos (Ansys, 2024). Portanto, o TSF foi ajustado gradativamente até que os resíduos da continuidade apresentassem um comportamento estacionário.

Nas últimas 1000 iterações, é notável o comportamento estável e praticamente constante, com a continuidade permanecendo abaixo de 10^{-4} , fator crítico para estabelecimento da convergência. Os outros resíduos seguiram o padrão de diminuição semelhante, mas com ordens de magnitude menores, atingindo valores inferiores a 10^{-6} para k e abaixo de 10^{-7} para o ω . Desta forma, percebe-se que a solução se encontra num regime estável e controlado, sem oscilações abruptas.

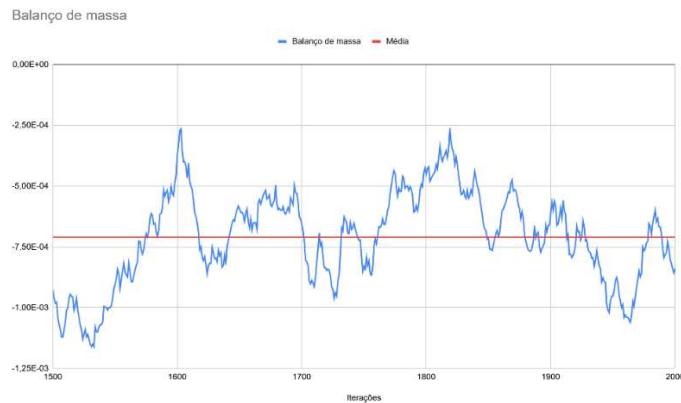
Figura 24 – Resíduos da solução final



Fonte: Autor (2025)

Além dos resíduos, foram adotados os parâmetros de balanço de massa do sistema e velocidade em um ponto da esteira, conforme mencionado no capítulo 3. O primeiro avalia se a lei da conservação de massa está sendo correspondida, logo, a diferença entre o fluxo de entrada e saída do domínio deve permanecer mínima, com valores baixos e sem tendência de divergência. A figura 25 apresenta o resultado do intervalo de 1500 a 2000 iterações e, apesar do comportamento oscilatório, a variação ocorre dentro de uma faixa com valores reduzidos, sendo coerente para escoamentos externos. O sinal negativo indica saída de massa do domínio, comportamento esperado em escoamentos externos. A linha em vermelho é o valor médio, pequeno em termos físicos e próximo de zero, $-0,00070996$ kg/s.

Figura 25 - Balanço de massa



Fonte: Autor (2025)

A velocidade de um ponto estratégico na esteira, pois sua variação está diretamente ligada a evolução do campo de escoamento, sendo altamente sensível a flutuações numéricas. A figura 26 mostra que a partir da iteração 1200, a velocidade atingiu praticamente um regime estacionário, apresentando oscilações mínimas em torno do valor médio de -6,98998 m/s. Isso sugere que o padrão da esteira e, conseqüentemente, a zona de recirculação, atingiram seu formato médio e intensidade final. O sinal negativo mostra que o fluxo da velocidade (no eixo X) é contrário ao do escoamento livre, caracterizando uma zona de recirculação.

Figura 26 – Velocidade em um ponto da esteira



Fonte: Autor (2025)

Ao verificar todos os critérios adotados, conclui-se que a simulação está convergida, de maneira satisfatória. Os resíduos possuem ordem de magnitude inferior a 10^{-4} , atendendo ao critério definido, enquanto os parâmetros adicionais,

balanço de massa e velocidade na esteira, demonstram estabilidade e sem tendência divergente. Portanto, o escoamento se encontra em um regime estacionário, apropriado para análises dos coeficientes aerodinâmicos e da esteira.

4.3 ANÁLISE DOS COEFICIENTES AERODINÂMICOS

4.3.1 Força e coeficiente de arrasto (C_D)

A figura 28 apresenta a evolução da força de arrasto do veículo ao longo das iterações da simulação. Inicialmente se observa o regime de primeira ordem até próximo da iteração 300 e após, uma queda brusca, resultante da troca para simulação de segunda ordem, a fim de aprimorar os resultados obtidos. Essa diferença é esperada, uma vez que o campo de pressão ao redor do veículo é redistribuído e a solução se ajuste a ele.

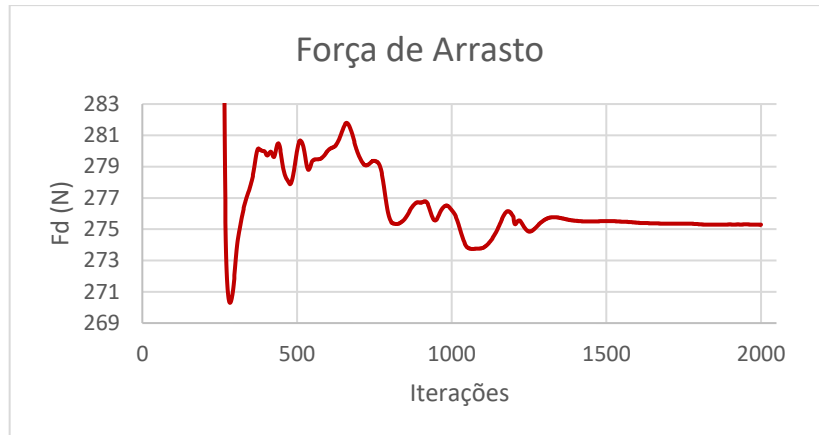
Figura 27 – Evolução da força de arrasto (N)



Fonte: Autor (2025)

A partir desse ponto, foi realizado um monitoramento mais aprofundado do comportamento da força, a fim de identificar a sua estabilização. O detalhe da figura 29 mostra a oscilação da força até ela ser considerada como convergida.

Figura 28 – Evolução da força de arrasto (N)



Fonte: Autor (2025)

Por recomendação, o guia teórico do Ansys Fluent, (2024) diz que para considerar os resultados válidos quando a sua evolução temporal mostra uma oscilação periódica de baixa amplitude. Desta forma, considerando a partir da iteração 1500 até 2000, ocorre a variação de apenas 0,0085%, confirmando o regime estabilizado.

O resultado da força de arrasto obtido foi de 275,36 N, o que corresponde ao C_D de 0,3334, conforme visto na tabela 2. Como a simulação foi desenvolvida com a condição de simetria, a força total de arrasto duas vezes o seu valor, 550,72 N. Comparando diretamente com os resultados de veículos comerciais similares como, vans, furgões e veículos utilitários, o C_D obtido se encontra um pouco abaixo da faixa típica, de 0,35 a 0,50 (Hucho, 1998).

Para uma análise mais profundada, a força de arrasto foi discretizada nas regiões selecionadas conforme foi realizado no capítulo 3. Dessa forma, é possível identificar as principais regiões contribuintes para a força de arrasto total. A tabela 4 exhibe os valores médios de contribuição de cada região.

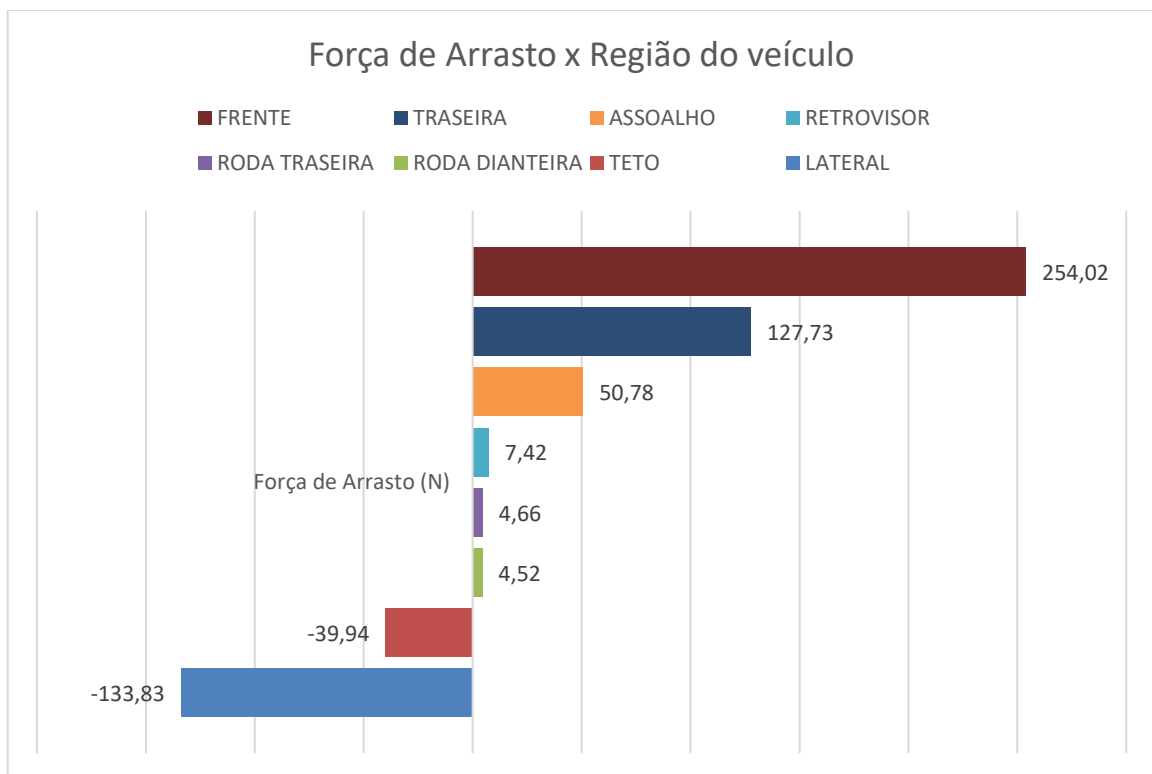
Tabela 4 – Força de arrasto e C_D por região

Região	Força de Arrasto (N)	C_D	% Total
Lateral	-133,8294	-0,1621	-48,6
Teto	-39,9358	-0,0484	-14,5
Roda dianteira	4,5217	0,0055	1,6
Roda traseira	4,6615	0,0055	1,7
Retrovisor	7,4169	0,009	2,7
Assoalho	50,7751	0,0615	18,4
Traseira	127,7254	0,1547	46,4
Frente	254,0245	0,3077	92,3
Total	275,36	0,3334	100

Fonte: Autor (2025)

Para uma visualização mais gráfica, a figura 29 apresentar a distribuição da força de arrasto por região, sendo possível identificar as partes da van que produzem maior impacto no arrasto total.

Figura 29 – Força de arrasto por região do veículo



Fonte: Autor (2025)

A região frontal é a maior responsável pelo arrasto total, com 92,3% e $C_D = 0,3077$. Esse resultado era esperado, visto que, o veículo pode ser considerado um

bluff-body do tipo squareback, onde a região frontal possui a maior concentração de estagnação do escoamento, sofrendo forte desaceleração e conseqüentemente, aumentando a pressão de arrasto (Hucho, 1998). De acordo com Viswanthan e Chode (2024), a região frontal é a parte que mais altera a distribuição de pressão e o campo de estagnação, influenciando diretamente o arrasto total.

A segunda maior contribuição para o arrasto, com 46,4% é a região traseira, com C_D parcial de 0,1547. Hucho (1998) afirma que veículos do tipo squareback possuem uma grande parcela do arrasto gerada devido a separação abrupta do escoamento na traseira vertical. Os autores Viswanthan e Chode (2024), reportam que a traseira neste tipo de veículo é uma das principais causas do arrasto, independentemente de alterações na geometria frontal.

O terceiro ponto de atenção, o assoalho, é responsável por 18,4% e seu C_D parcial é de 0,0615. Sua contribuição é significativa, uma vez que, seu formato irregular não proporciona um escoamento adequado do fluido, sofrendo forte influência da turbulência gerada pelas rodas em rotação. Mais detalhes serão discutidos na sessão de análise da esteira.

O retrovisor por sua vez, gera um impacto no arrasto de apenas 2,7% com C_D parcial de 0,009. Apesar de baixa porcentagem na contribuição para o arrasto total, ele impacta diretamente no escoamento ao seu redor, criando zonas de separação, formação de vórtices (Hucho, 1998).

As rodas do veículo têm impacto baixo comparado as demais regiões. Cada roda possui C_D parcial de 0,0059, que representa 1,7%, totalizando 3,4%. O valor reduzido do arrasto para cada uma é proveniente da simplificação geométrica realizada, mas seu impacto na interação com o assoalho é significativo.

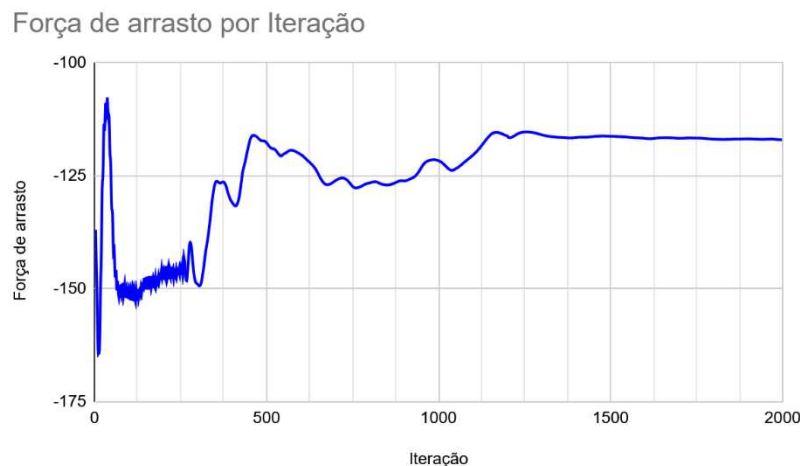
O teto é a primeira região do veículo que apresenta contribuição de redução do arrasto. Hucho (1998) afirma que, em bluff-body do tipo squareback, o escoamento ao redor da região superior permanece aderido e com baixa tendência a separação. O valor negativo é tendencioso e pode levar a uma análise errônea, portanto é um ponto crítico a ser estudado mais adiante. O teto do veículo é responsável por -14,5% ou C_D parcial de -0,0484, contribuindo favoravelmente para a aerodinâmica.

A lateral resultou na maior porcentagem de redução de todo o arrasto, -48,6%, com C_D parcial de -0,1621. Como a coluna A foi selecionada pertencendo a seleção da lateral e ela é uma superfície com uma curvatura suave e assim como o teto, também é um ponto crítico de estudo a ser explorado em conjunto com o mapa de C_P .

4.3.2 Força e coeficiente de sustentação (C_L)

A sustentação observada no veículo apresentou um comportamento similar ao arrasto. Nas primeiras 300 iterações, ocorreu uma oscilação forte, devido ao escoamento estar se desenvolvendo em primeiro grau. A partir desse ponto, como mencionado anteriormente, ao trocar para segunda ordem, a sustentação passou a exibir um comportamento oscilatório mais estável. Fatores na simulação foram ajustados até que a força de arrasto pudesse ser considerada convergida. A figura 30 exibe a evolução da força de arrasto por iteração. A região entre 1500 e 2000 iterações mostrou comportamento convergente com variação menor que 1%.

Figura 30 – Evolução da força de sustentação



Fonte: Autor (2025)

O resultado da força de sustentação foi de -116,70 N, correspondendo ao C_L de -0,14128. Assim como a força de arrasto, pela condição de simetria, o valor total da força é de -233,4 N. Esse valor representa uma força que empurra o veículo contra o solo, melhorando sua estabilidade direcional e reduzindo a sua sensibilidade a ventos laterais. Como o veículo analisado foi idealizado para o transporte de carga, tipicamente utilizado em baixas e médias velocidades, o impacto da sustentação sobre a sua utilização é mínimo. Segundo Hucho (1998) veículos do tipo squareback possuem características que apresentam esse comportamento, com o escoamento aderido ao teto, na lateral e assoalho, até a borda traseira, criando regiões de sucção que levam a sustentação tanto positiva quanto negativa. O valor negativo se deve pelo

balanço de forças, onde o teto e laterais possuem predominância de sustentação positiva enquanto o assoalho e traseira possuem negativa.

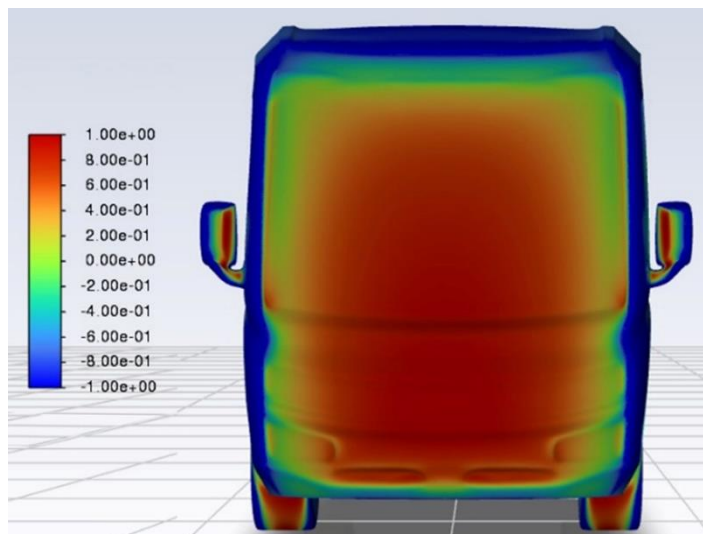
O coeficiente de sustentação ou sua força não possui relação direta com o consumo energético, ou seja, não participa do cálculo de perda de potência atrelado a resistência aerodinâmica. Ele está relacionado ao comportamento dinâmico em alta velocidade e estabilidade direcional, podendo ser considerado como um efeito secundário na eficiência global do veículo.

4.3.3 Coeficiente de pressão (C_P)

O coeficiente de pressão ao redor do veículo permite identificar as áreas de estagnação, aceleração do escoamento e zonas de baixa pressão. Essa análise foi feita simultaneamente com o C_D e C_L , corroborando para compreender as áreas que contribuem positivamente ou negativamente para a aerodinâmica do veículo.

A figura 31 mostra a região frontal do veículo. Através dela é possível perceber o amplo campo de C_P positivo, região vermelha, caracterizando a zona de estagnação do escoamento, que contribui para o aumento do arrasto. O contorno em azul ressalta que existe uma aceleração do escoamento, sendo benéfico pois faz com que o fluxo siga aderido para a lateral e teto. Outro fator contribuinte para o arrasto são os retrovisores, que possuem um gradiente de pressão elevado, levando a formação de vórtices e gerando aumento do arrasto.

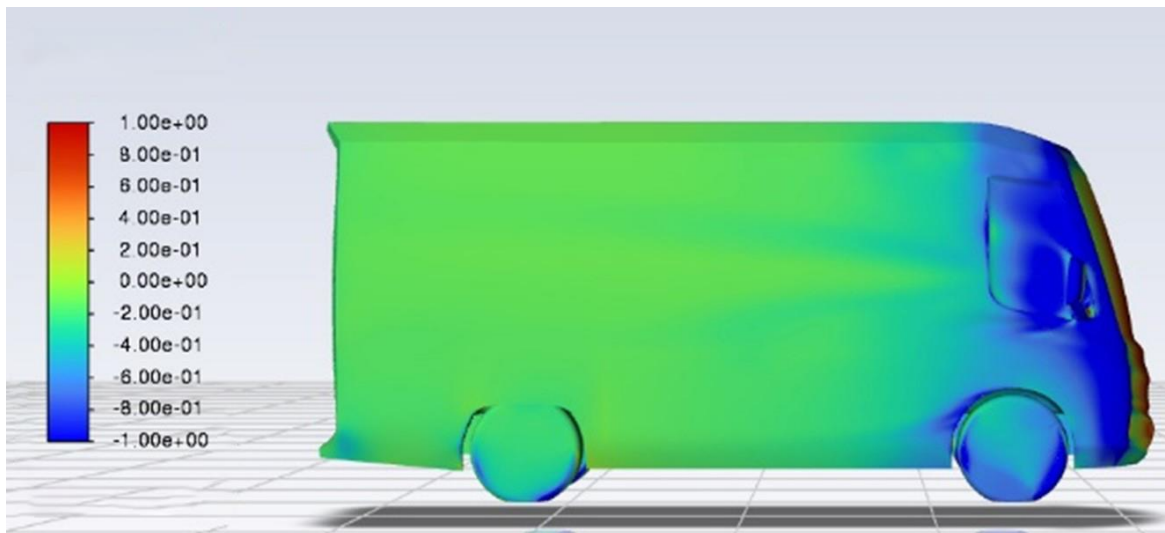
Figura 31 – Vista frontal do C_P



Fonte: Autor (2025)

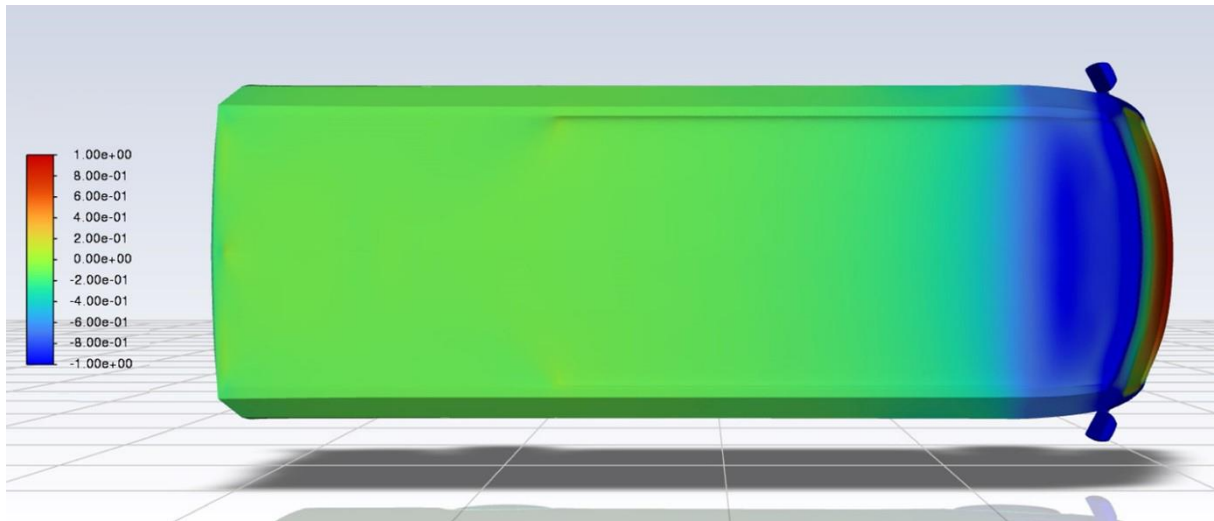
A região lateral, por sua vez, mostra na figura 32 áreas acentuadas de C_p negativo, resultado da forte aceleração do escoamento ao contornar a coluna A. Após isso, o escoamento ao longo da lateral do veículo tende a estabilizar. Conforme descrito por Hucho (1998), em veículos de corpo longo como ônibus e vans, as superfícies laterais extensas após o bordo de ataque comportam-se de maneira análoga a uma placa plana paralela ao escoamento e o gradiente de pressão longitudinal torna-se desprezível. As rodas em contrapartida, possuem um gradiente de C_p um pouco diferente, associado à sua rotação e interação ao solo.

Figura 32 – Vista lateral do C_p



Fonte: Autor (2025)

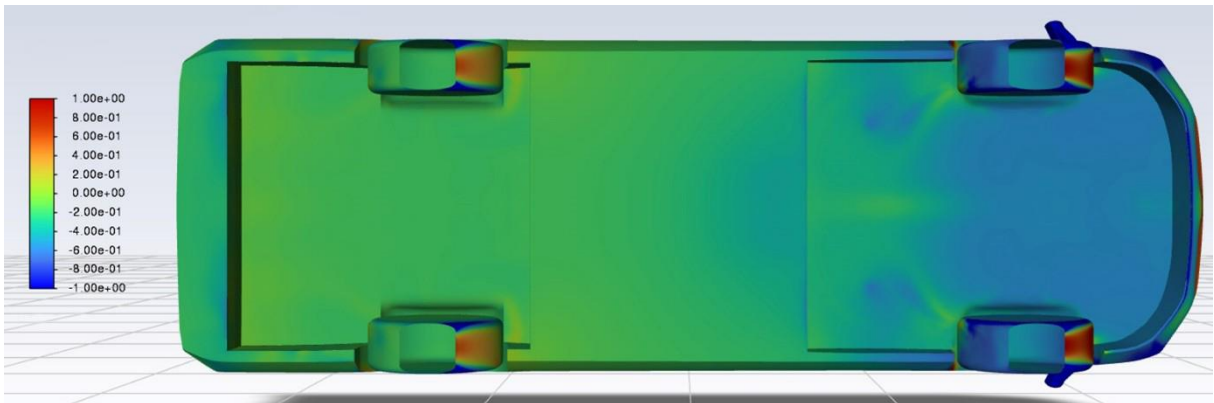
Na vista superior, figura 33, o comportamento do C_p evidencia que toda superfície do teto apresenta pressões negativas, especialmente na região frontal, onde a uma pequena curvatura (azul intenso). Ao longo do restante do teto, o valor de C_p se mantém próximo de zero, indicando um gradiente de pressão fraco e escoamento aderido até a borda da traseira.

Figura 33 - Vista superior do C_p 

Fonte: Autor (2025)

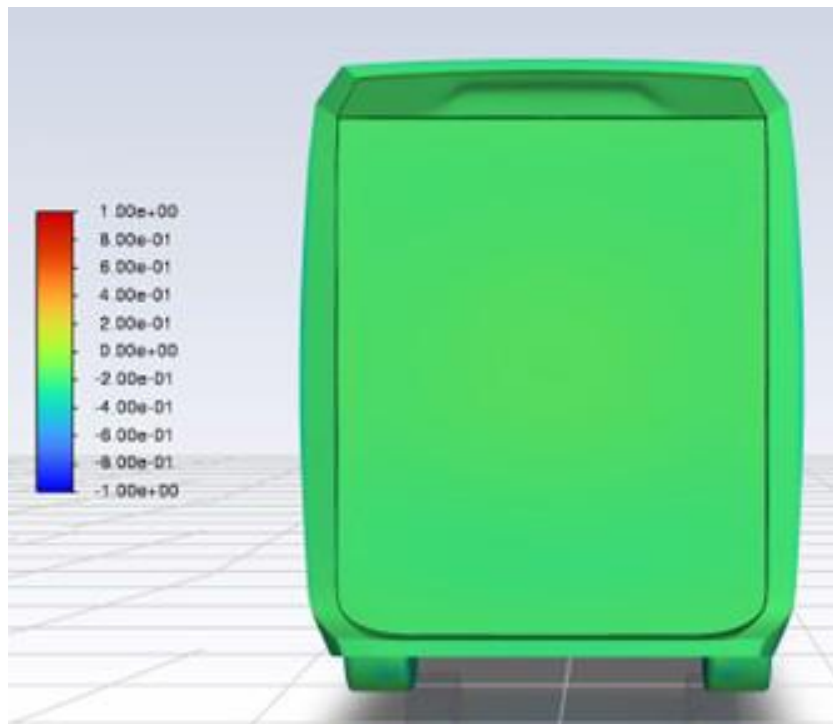
Para os resultados do teto e da lateral, faz-se necessária uma ressalva: a magnitude das forças pode ter sido influenciada pelos elevados gradientes de pressão locais. Portanto, os valores obtidos nestes pontos críticos devem ser interpretados com cautela, não se descartando a possibilidade de que a discretização da malha ou a sensibilidade do solver tenham superestimado a intensidade da força. Recomenda-se que, em etapas futuras, seja realizado um estudo de refinamento nestas regiões para discernir com clareza a contribuição física real de possíveis artefatos numéricos.

Para o assoalho, conforme apresentado na figura 34, o C_p inicia em pressão negativa na região frontal, evidenciando uma forte sucção do fluxo após a sua entrada. Isso resulta em uma aceleração do escoamento, causado pela limitação da altura entre o veículo e o solo (Hucho, 1998). Na região central do assoalho, onde ficam alocadas as baterias, existe uma pequena região de baixa pressão, gerando novamente uma área de sucção e a evolução do C_p para valores próximos de zero, que se estendem até o encontro do para-choque traseiro. Na região de saída do assoalho, há novamente uma leve queda da pressão, ou seja, uma aceleração do escoamento, contribuindo para a força de sustentação negativa obtida na simulação. As rodas, tanto dianteiras quanto traseiras, exibem zonas de estagnação típicas, gerando aumento do arrasto. Além disso, a ausência de para-barros internos, principalmente na dianteira, favorece a formação de zona de recirculação, aumentando o arrasto total do veículo.

Figura 34 - Vista inferior do C_P 

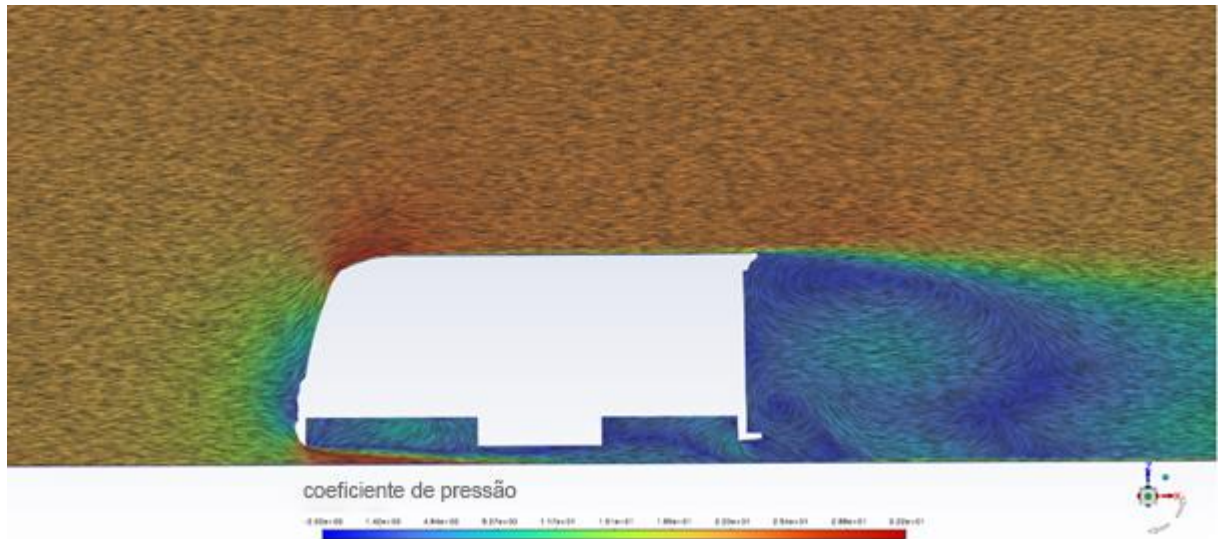
Fonte: Autor (2025)

A região traseira do veículo exibe um C_P aproximadamente negativo em sua totalidade, o que ressalta a existência de uma zona de baixa pressão após o escoamento se separar da borda do aerofólio e do para-choque. Hucho (1998) relata que devido a essa configuração, de separação abrupta do escoamento, resulta em uma pressão inferior à do escoamento livre, gerando zonas de recirculação e consequentemente, sendo responsável por uma parcela significativa de arrasto.

Figura 35 - Vista posterior do C_P 

Fonte: Autor (2025)

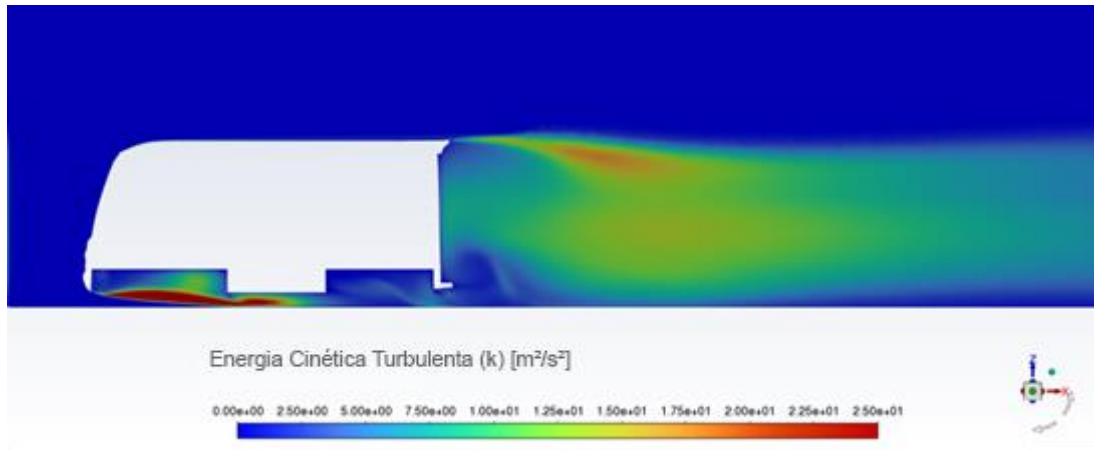
Figura 37 – Velocidade do escoamento no plano de simetria



Fonte: Autor (2025)

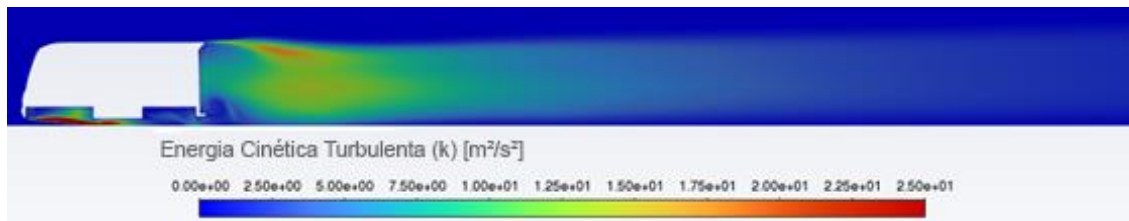
A região traseira apresenta uma grande separação, bem definida na borda do teto quanto no assoalho, que se combinam para gerar toda a região da esteira, alimentando com vorticidade e ampliando a mistura. A presença de uma bolha central é uma característica comum da geometria squareback, possuindo uma esteira profunda e energizada, compatível com o valor do C_D elevado. Os vórtices existentes dificultam a recuperação de pressão, enquanto a influência do assoalho com suas zonas mortas e fluxo lento, gere regiões de sucção próximas ao solo, aumentando consequentemente o arrasto. A figura 38 mostra o campo de energia cinética produzida pela esteira. É observado que a esteira se mantém energizada por mais de um comprimento do veículo, com decaimento gradual e lento ao longo da direção do escoamento (figura 39). Isso ocorre, pois, a separação superior ao se encontrar com o gradiente de pressão adverso, produz uma camada de cisalhamento intensificada, gerando um aumento da enérgica cinética. Analisando a região inferior, o assoalho, o fluxo acelerado em contato com as zonas mortas, cria um forte gradiente de energia cinética turbulenta, que é adicionado na esteira inferior. Hucho (1998) afirma que esteiras com alta enérgica cinética turbulenta são típicas de squareback, sendo o controle da esteira mais eficaz na redução do C_D do que alteração na estagnação frontal.

Figura 38 – Campo de energia cinética turbulenta no plano de simetria



Fonte: Autor (2025)

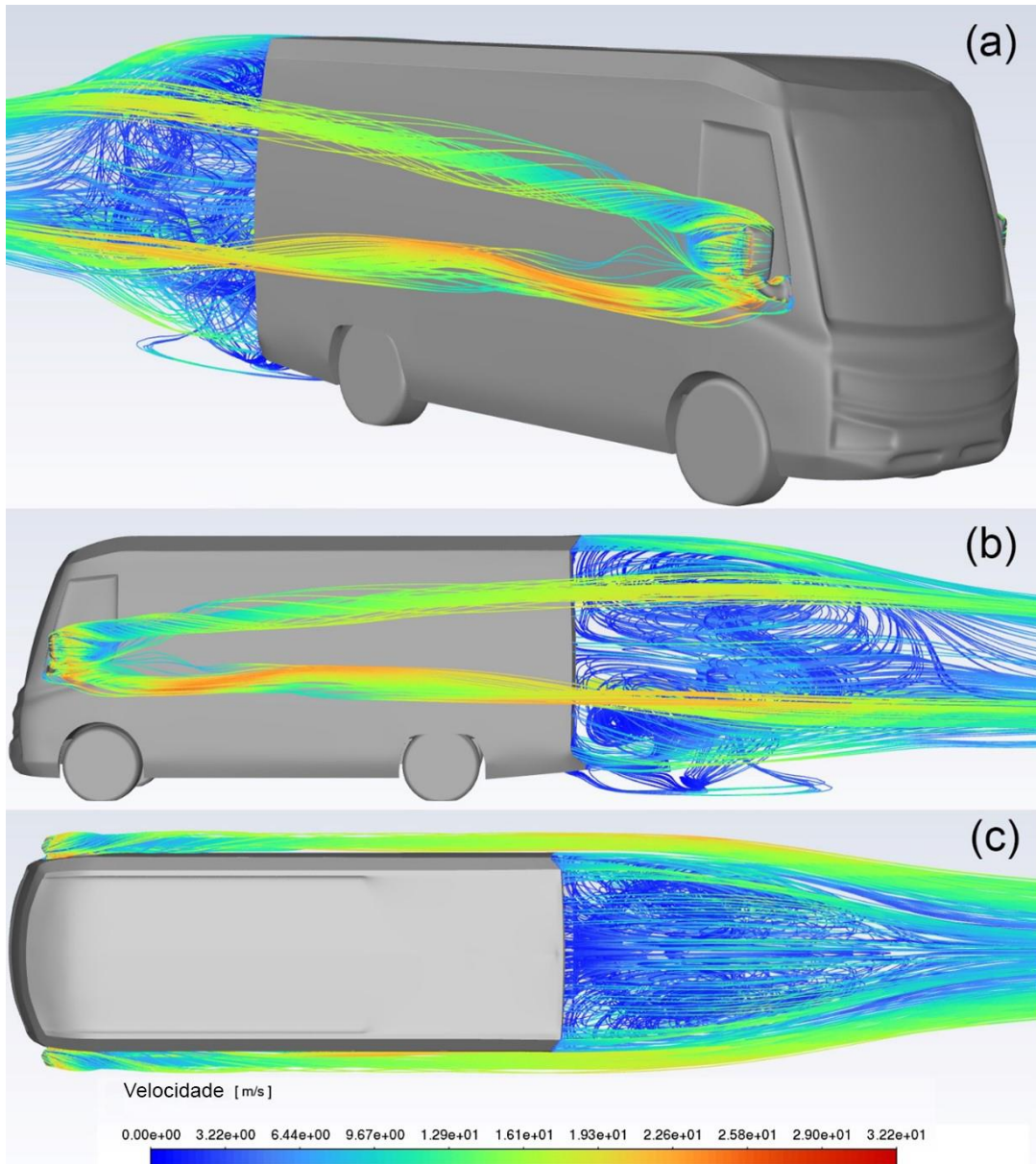
Figura 39 – Comprimento da energia cinética turbulenta no plano de simetria



Fonte: Autor (2025)

Os espelhos retrovisores criam dois escoamentos distintos, um superior, energizado e um inferior, percorrendo a lateral do veículo. Na figura 40, os escoamentos são representados nas vistas: a) perspectiva, b) superior e c) lateral. Esses fluxos, com vorticidade estável e relativamente organizada, contornam toda a região da esteira traseira, com maior velocidade e, portanto, energia cinética por maior distância, sem sofrer uma dissipação rápida. A esteira principal do veículo permanece alimentada pela separação escoamento superior (teto) e inferior (assoalho), enquanto os fluxos do retrovisor têm interação somente com as camadas externas.

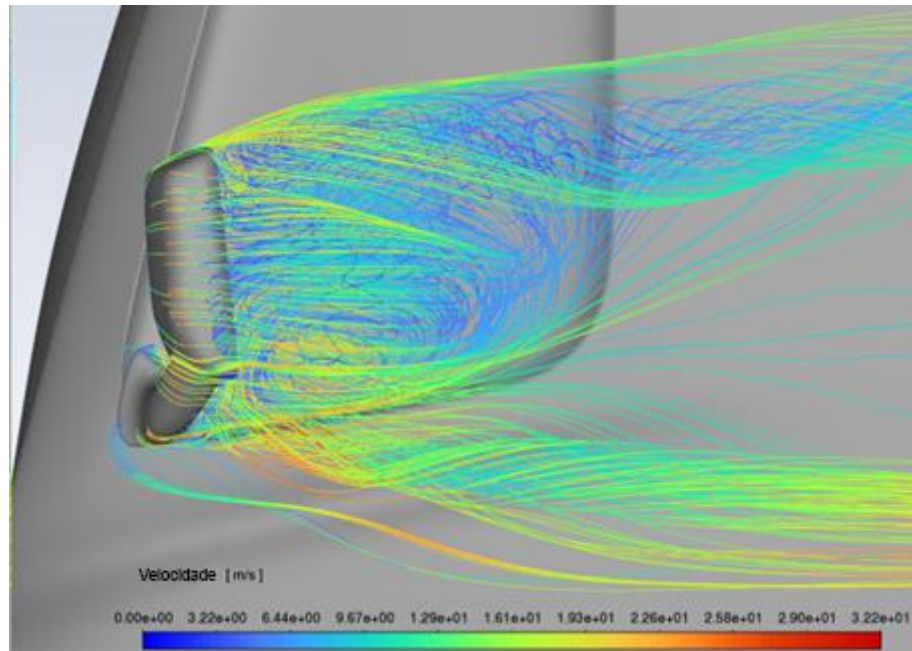
Figura 40 – escoamento resultante do retrovisor



Fonte: Autor (2025)

Apesar da baixa interação com a esteira traseira, o retrovisor gera sua própria região turbulenta, conforme a figura 41 mostra. Ele atua gerando separação abrupta do escoamento, tanto superior e inferior, igualmente ao próprio veículo. A região a jusante do espelho indica que a interação entre os dois fluxos cria uma zona de recirculação, com camada de cisalhamento energizada e turbulência local intensa, aumentando a sua contribuição para o arrasto do veículo.

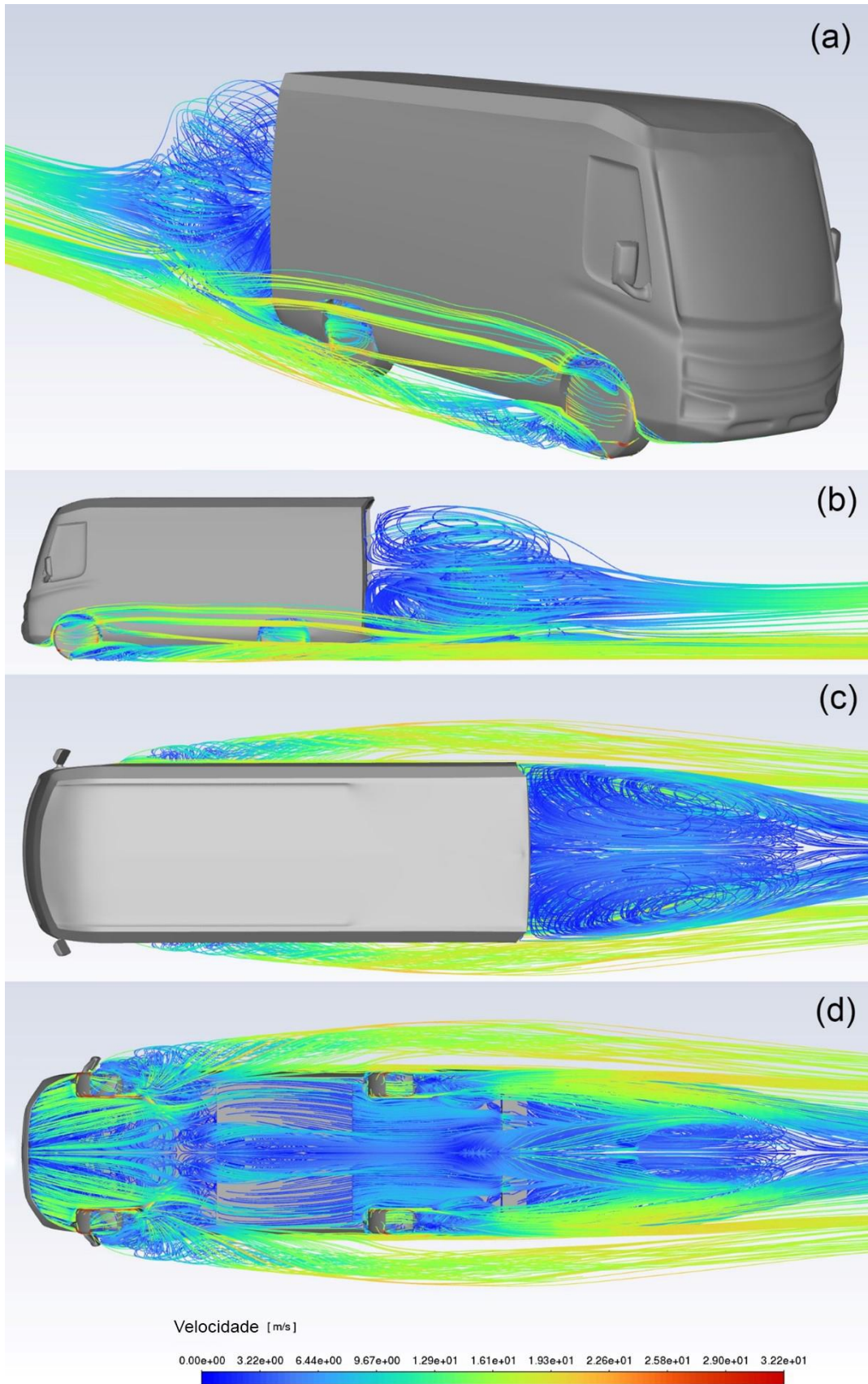
Figura 41 – Região turbulenta do retrovisor



Fonte: Autor (2025)

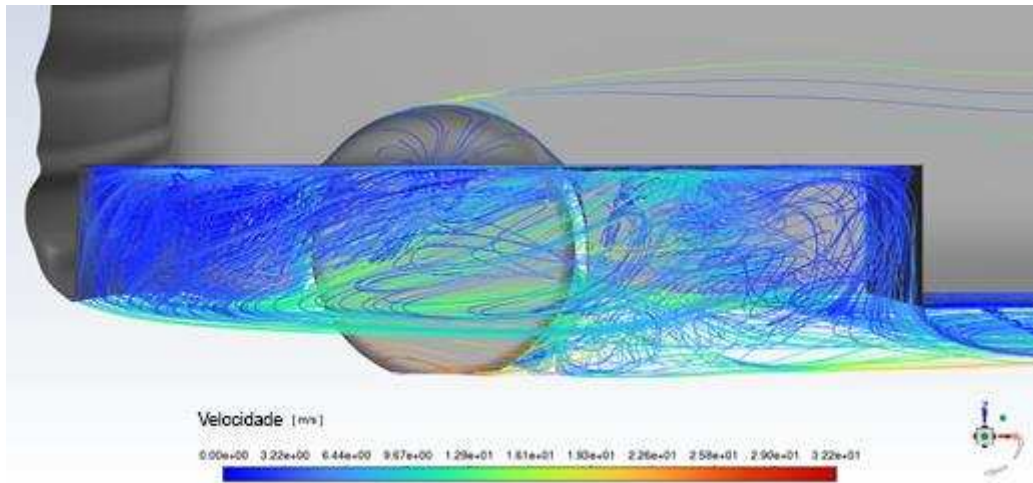
Outro ponto a ser analisado com maior detalhamento é a interação do escoamento das rodas e do assoalho, principalmente devido a sua geometria com cavidades e ressalto central. A figura 42 apresenta as vistas deste escoamento, sendo (a) em perspectiva, (b) lateral, (c) superior e (d) inferior. O conjunto rodas e assoalho tem atuação como fonte significativa de vorticidade e energia turbulenta, influenciando diretamente a esteira traseira. Na roda dianteira, ocorre a separação de duas camadas, uma porção superior e outra inferior. Esses escoamentos externos, se desprendem lateralmente da roda e alimentam a esteira traseira energizando o vórtice inferior. Já o fluxo interno que sai diretamente atrás da roda dianteira (figura 43), apresenta baixa velocidade e alta turbulência, preenchendo toda a cavidade com uma zona de recirculação. Essa região fica separada pelo fluxo externo que cria uma camada de cisalhamento intensa, como visto nas figuras 37 e 38.

Figura 42 – escoamento resultante das rodas e assoalho



Fonte: Autor (2025)

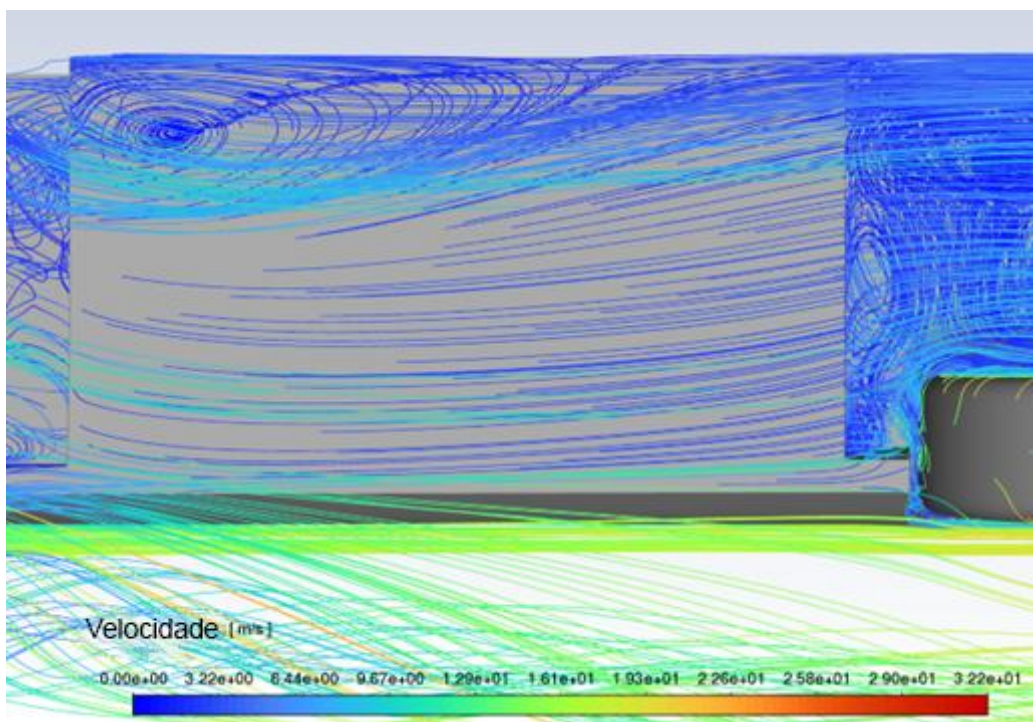
Figura 43 – detalhe do escoamento na cavidade frontal do assoalho



Fonte: Autor (2025)

A região central do assoalho (figura 44), apresenta um comportamento distinto das cavidades. Ele atua como um corredor para o escoamento, com fluxo lento. A energia cinética turbulenta que entra devido ao escoamento acelerado da dianteira, é rapidamente dissipada (figura 38), tornando essa região um “reservatório” de baixa energia para a cavidade traseira.

Figura 44 – detalhe do escoamento na cavidade central do assoalho

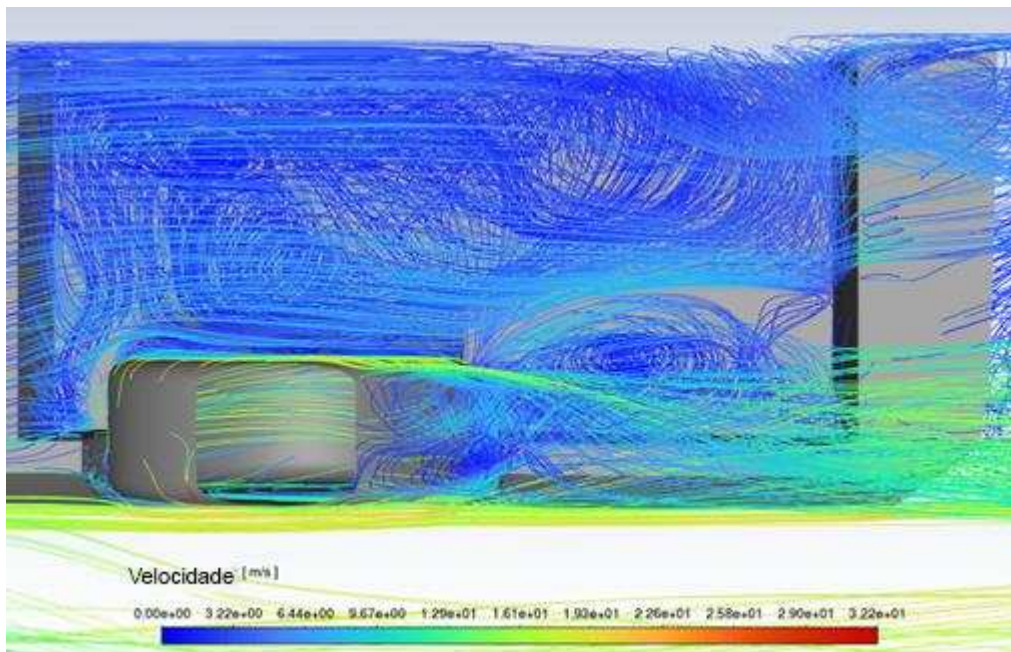


Fonte: Autor (2025)

A cavidade traseira exibe a formação de vários vórtices acoplados, visíveis na figura 45. Essa vorticidade é distribuída em níveis superior, inferior e lateral, todos dentro da cavidade traseira do assoalho, formando uma forte zona de recirculação. Conseqüentemente esse conjunto de vórtices é responsável por grande parte da vorticidade e energia cinética turbulenta na porção inferior da esteira traseira.

A roda traseira, gera vórtices que se combinam com os da cavidade, mas também gera fluxo acelerado que alimenta a esteira diretamente, destacados pelas linhas verdes na figura 42 (d) e figura 45.

Figura 45 – detalhe do escoamento na cavidade traseira do assoalho

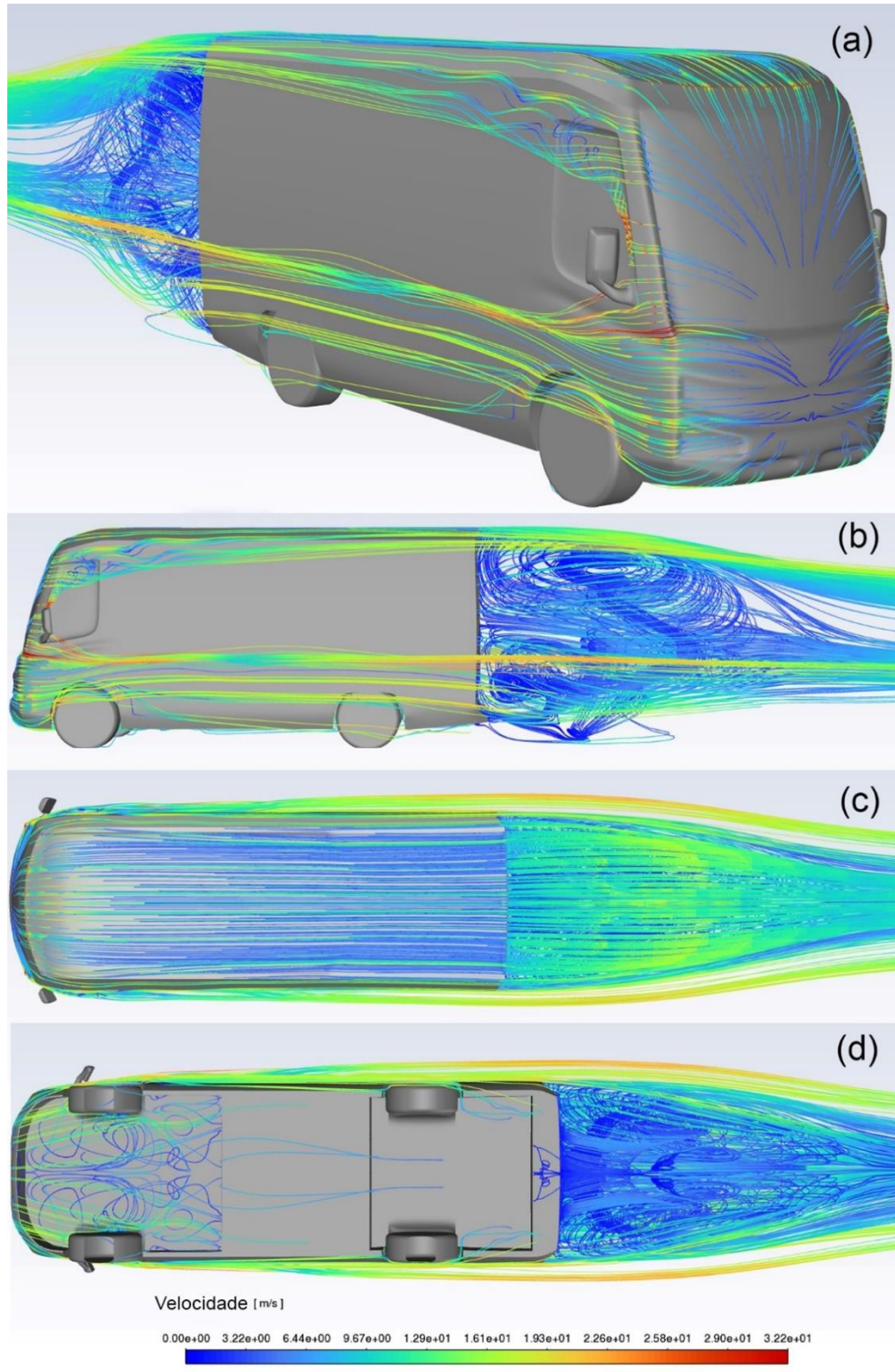


Fonte: Autor (2025)

A figura 46 detalha a formação da esteira traseira em quatro vistas, (a) perspectiva, (b) lateral, (c) superior e (d) inferior. A partir da região frontal do veículo, o escoamento contorna a carroceria, seguindo aderido pela lateral e teto. Na vista lateral (b), é nítido o ponto de separação do escoamento, que dá origem ao grande vórtice visto na parte superior da esteira. Também é possível notar que o fluxo inferior do veículo, tanto do assoalho quanto da lateral alimenta o vórtice inferior. Esses dois vórtices interagem entre si, criando uma grande zona de recirculação, correspondendo ao elevado C_D . Na vista inferior (d), é possível identificar como as cavidades são preenchidas somente pelo escoamento frontal, reforçando a condição de zona morta

da cavidade frontal. Por fim, a esteira traseira é formada pela combinação dos escoamentos inferior e superior, criando uma grande bolha de recirculação, responsável pelo arrasto aerodinâmico do veículo.

Figura 46 – escoamento resultante da frente e traseira



Fonte: Autor (2025)

4.5 POTÊNCIA E CONSUMO DO ARRASTO

O cálculo da potência de arrasto é necessário para prever o desempenho energético do veículo. Ele representa a energia que o veículo precisa vencer a resistência aerodinâmica enquanto está em movimento. Como a potência de arrasto depende do coeficiente de arrasto (equação 7), ou melhor, a força de arrasto, a velocidade se torna um fator com grande impacto no consumo energético:

$$P_d = F_d \cdot v,$$

$$P_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \cdot C_D \cdot A, \quad (33)$$

Onde F_d é a força de arrasto e v é a velocidade. O consumo (energia) por quilometro associado ao arrasto pode ser calculado através da equação 34.

$$E_{d/km} = \frac{P_d}{v} \quad (34)$$

Para a obtenção dos resultados da potência e consumo de arrasto foram utilizados os dados obtidos neste estudo, disponibilizados na tabela 5.

Tabela 5 – Dados para cálculo da potência de arrasto

Parâmetro	Valor
Força de arrasto (meio veículo)	275,36 N
Força de arrasto total	550,72 N
Velocidade para cálculo	80km/h ou 22,22 m/s
Velocidade máxima declarada	105km/h ou 29,16 m/s
Potência do veículo (motor elétrico)	183 cv ou 134,6 kW
Capacidade da bateria	85kWh
Consumo médio declarado	0,4 kWh/km
Autonomia	200 km
PBT / peso vazio	5300 kg / 3300 kg

Fonte: Autor (2025)

O resultado obtido da potência de arrasto calculado é de:

$$P_d = 550,72 \cdot 22,222 \approx 12,24 \text{ kW}, \quad (35)$$

e a energia por km é:

$$E_{d/\text{km}} = \frac{550,72 \cdot 1000}{3,6 \times 10^6} \approx 0,153 \text{ kWh/km}. \quad (36)$$

Portanto, a energia associada ao arrasto é responsável por aproximadamente 38% do consumo médio declarado pelo fabricante, sendo considerado como dominante em velocidades elevadas. Em contrapartida, a potência de arrasto corresponde somente a 9% da potência de pico do motor. Extrapolando os dados para velocidade entre 60km/h e 100km/h, é possível identificar a sensibilidade da velocidade sobre a potência e o consumo do arrasto. Refazendo todos os cálculos para essas condições e estimando a força de arrasto através da relação quadrática entre as velocidades, são obtidos os seguintes resultados, dispostos na tabela 6.

Tabela 6 – Potência e energia de arrasto em diferentes velocidades

Velocidade (km/h)	Potência de arrasto P_d (kW)	Energia por km $E_{d/\text{km}}$ (kWh/km)	% do consumo total (0,40 kWh/km)
60	5,16	0,086	21,51%
80	12,23	0,153	38,24%
100	23,90	0,239	59,76%

Fonte: Autor (2025)

Os resultados apresentados para a potência de arrasto e a energia associada por quilometro evidenciaram o seu impacto na eficiência energética do veículo. A 80km/h, 38% do consumo declarado de 0,40kWh/km é devido ao arrasto, reduzindo a autonomia do veículo. Apesar de operar regularmente em baixas velocidades em circuitos urbanos com limites de velocidade estabelecidos, a partir de 60km/h, o consumo passa a ser reduzido pela energia associada ao arrasto aerodinâmico.

5 CONCLUSÃO

O estudo da aerodinâmica do veículo elétrico comercial leve Arrow One através de simulação CFD, permitiu compreender o comportamento do escoamento externo e sua influência direta na eficiência energética. O contexto atual de transição de motores a combustão para a eletrificação, amplia a necessidade de autonomia dos EV's, especialmente os comerciais, que por serem utilizados em trajetos urbanos, necessitam de uma elevada eficiência e baixo consumo. Por este motivo, entender como os efeitos aerodinâmicos impactam diretamente na eficiência energética é fundamental para o desenvolvimento de veículos mais sustentáveis.

A metodologia implementada para a elaboração do estudo foi essencial para a determinação da convergência e alcance do regime assintótico entre as malhas. A utilização do método GCI permitiu avaliar a sensibilidade de cada simulação realizada ao refinamento de malha. Embora os valores obtidos para o coeficiente de arrasto apresentem comportamento fisicamente consistente, o mesmo não ocorreu para o coeficiente de sustentação e momento, não atingindo o critério de convergência definido entre as malhas. Isso evidencia que ainda existe a necessidade de refinamento da malha, especialmente pelo escoamento complexo existente entre a região do assoalho e as rodas, fator limitante pela capacidade de RAM disponível.

Os resultados obtidos demonstram que os objetivos especificados foram alcançados, com a determinação proposta do C_D por região do veículo, pontos de estagnação, análise da esteira e vorticidade e o impacto do arrasto no consumo declarado. O coeficiente de arrasto obtido foi de $C_D = 0,3334$ e a análise da esteira demonstrou que ela é composta por dois grandes vórtices, que são alimentados pela separação do escoamento na borda do teto na traseira e pela saída do assoalho. A interação destes dois vórtices gera uma grande bolha de recirculação, que contribui para a resistência elevada neste tipo de geometria, squareback.

Além disso, outro resultado relevante foi o cálculo da potência de arrasto, 12,24 kW a 80 km/h, que representa aproximadamente 38% do consumo declarado pelo fabricante. Portanto, o arrasto aerodinâmico é um fator predominante na eficiência energética em velocidades moderadas, o que reforça a importância de se desenvolver designs mais aerodinâmicos para os veículos, especialmente em geometrias squareback. A análise do campo de pressão em conjunto com a esteira ajudou a

identificar pontos de oportunidades de melhoria, como as cavidades do assoalho, retrovisores e a região traseira do veículo.

Para trabalhos futuros, é recomendado que o refinamento de malha seja continuado até que todos os coeficientes do estudo atinjam a convergência monoatômica, seguindo a metodologia implementada. Para um maior aprofundamento do entendimento da formação da esteira, a troca do regime permanente pelo transiente para capturar com maior fidelidade os fenômenos físicos. Além disso, recomenda-se:

- Utilizar o parâmetro de parede com $Y^+ < 1$, permitindo a resolução completa da camada limite sem o uso de funções de parede;
- Realizar a simulação em diferentes velocidades, como 60km/h e 100km/h para comparar os resultados no consumo energético;
- O estudo em túnel de vento do veículo real para validação dos resultados;
- O estudo de soluções aerodinâmicas para aumento de autonomia;

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Global EV outlook 2021**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>. Acesso em: 22 out. 2023
- AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Global EV outlook 2023**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-electric-light-duty-vehicles>. Acesso em: 21 out. 2023
- ANSYS INC. **Introduction to ANSYS FLUENT: Turbulence modeling**. Canonsburg, PA, USA, 2010. Disponível em: https://imechanica.org/files/fluent_13.0_lecture06-turbulence.pdf. Acesso em: 20/10/2025
- ANSYS INC. **Ansys Fluent User Guide 2024 R02**. Disponível em: <https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html>. Acesso em: 15/7/2025.
- ANSYS INC. **ANSYS Fluent Mosaic Technology Automatically Combines Disparate Meshes with Polyhedral Elements for Fast, Accurate Flow Resolution**. S.D. Canonsburg, PA, USA. Disponível em: <https://www.ansys.com/content/dam/resource-center/white-paper/ansys-fluent-mosaic-technology-wp.pdf>. Acesso em: 20/10/2025
- Arrow Mobility S.A. Disponível em: <<https://arrowmobility.com.br/>>. Acesso em: 2025.
- ANDERSON, J. D. **Fundamentals of Aerodynamics**. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2017.
- BABU, A. R. **CFD investigation on wheel modelling and car aerodynamics**, 2019. Chalmers University of Technology.
- BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. **Low-speed Wind Tunnel Testing**. 3º ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- BERTIN, J. J.; CUMMINGS, R. M. **Aerodynamics for engineers**. 6. ed. Harlow: Pearson Higher, 2013
- BLAZEK, J. **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**. Elsevier, 2005.
- CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; et al. **Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications**. Journal of Fluids Engineering, v. 130, n. 7, p. 078001, 2008.
- ÇENGEL Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid mechanics: fundamentals and applications**. 3. ed. Nova Iorque: Mcgraw Hill, 2014
- EHSANI, M.; GAO, Y.; GAY, S.; EMADI, A. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles fundamentals, theory, and design**. Boca Raton: Crc Press, 2004.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**. Springer Science & Business Media, 2012.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 8. ed. Rio De Janeiro: Ltc, 2013.

GILLESPIE, T. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. SAE International, 1992.

GUTIERREZ, J. E. C.; DUARTE, L. E. V.; OLIVEIRA JR., A. A. M.; CANCINO, L. R. **The Ahmed Body's External Aerodynamics at 25° Slant Angle Rear Surface: A Numerical Analysis Using CFD**. 18th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering – ENCIT 2020.

HEISLER, H. **Advanced vehicle technology**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

HUCHO, W.-H. **Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 1998.

HULUKA, A. W.; KIM, C. H. **Numerical study on aerodynamic drag reduction and energy harvest for electric vehicles: a concept to extend driving range**. IOP Conference Series: materials science and engineering, v. 700, n. 012009, 2019.

LANFRIT, M. **Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT**. Darmstadt, 2005.

LEAP AUSTRALIA. **Understanding the physics of boundary layers – LEAP Australia Blog**. Disponível em: <https://www.leapaust.com.au/blog/cfd/y-plus_part1_understanding-the-physics-of-boundary-layers/>. Acesso em: 15/8/2025.

LITTLEWOOD, R. P.; PASSMORE, M. A. **Aerodynamic drag reduction of a simplified squareback vehicle using steady blowing**. Experiments in Fluids, v. 53, n. 2, p. 519–529, 4 maio 2012.

LUDVIGSEN, K. **The time tunnel - a historical survey of automotive aerodynamics**. SAE Technical Paper Series, v. 700035, Detroit, dez. 1970

NOEL, L.; ZARAZUA DE RUBENS, G.; KESTER, J.; SOVACOOOL, B. K. **Understanding the socio-technical nexus of nordic electric vehicle (EV) barriers: a qualitative discussion of range, price, charging and knowledge**. Energy Policy, v. 138, p. 111292, jan. 2020.

O'CONNEL, A.; PAVLENKO, N.; BIEKER, G.; SEARLE, S. **Battery electric trucks emit 63% less GHG emissions than diesel**. Disponível em: <https://theicct.org/battery-electric-trucks-emit-63-less-ghg-emissions-than-diesel/>. Acesso em: 7 nov. 2023

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **The Paris agreement**. Disponível em: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>. Acesso em: 29 out. 2023

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Electric light duty vehicles**. Disponível em: <https://www.unep.org/explore-topics/transport/what-we-do/electric-mobility/electric-light-duty-vehicles>. Acesso em: 21 out. 2023

REMMERIE, W. **EV range - the race for aerodynamic efficiency**. Disponível em: <https://airshaper.com/blog/electric-vehicle-aerodynamics-improving-range>. Acesso em: 29 nov. 2023

ROACHE, P. J. **Verification and validation in computational science and engineering**. Albuquerque, N.M.: Hermosa Publishers, 1998, 2009.

VISWANATHAN, H.; KUSHAL KUMAR CHODE. **The Role of Forebody Topology on Aerodynamics and Aeroacoustics Characteristics of Squareback Vehicles using Computational Aeroacoustics (CAA)**. Flow Turbulence and Combustion, v. 112, n. 4, p. 1055–1081, 2024. Springer Science+Business Media.

WHITE, F. M. **Fluid mechanics**. 7. ed. Nova Iorque: Mcgraw Hill, 2011.

WORLD WILDLIFE FUNDATION. **As mudanças climáticas**. Disponível em: https://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/reducao_de_impactos2/clima/mudancas_climaticas2/. Acesso em: 29 nov. 2023

ZHOU, H.; ZHU, H.; YANG, Z. **Aerodynamic calculation of MIRA model correlated with wind tunnel test**. Journal of Jilin University, v. 49, n. 4, p. 1–11, 2019.