

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DA AERODINÂMICA DE UM
VEÍCULO COLETIVO DE TRANSPORTE DE PASSAGEIROS
EM TÚNEL DE VENTO**

KAIQUE CAETANO CESÁRIO RODRIGUES

GOIÂNIA
2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG)

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Kaique Caetano Cesário Rodrigues

Título do trabalho: Análise experimental da aerodinâmica de um veículo coletivo de transporte de passageiros em túnel de vento

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(a)(s) autor(a)(es)(as) e ao(a) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 06/07/2026, às 08:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Kaique Caetano Cesário Rodrigues, Discente**, em 06/07/2026, às 09:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6301672** e o código CRC **7CD4BE25**.

KAIQUE CAETANO CESÁRIO RODRIGUES

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA AERODINÂMICA DE UM VEÍCULO COLETIVO DE TRANSPORTE DE PASSAGEIROS EM TÚNEL DE VENTO

Projeto Final de Curso apresentado como requisito
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Mecânica pela Universidade Federal de Goiás –
Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de
Computação.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Pamplona Mariano

GOIÂNIA
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rodrigues, Kaique Caetano Cesário

Análise experimental da aerodinâmica de um veículo coletivo de transporte de passageiros em túnel de vento. [e-books] / Kaique Caetano Cesário Rodrigues. - 2026.

LXIX, 69 f.: 2026

Orientador: Prof. Dr. Felipe Pamplona Mariano

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Mecânica, Goiânia, 2026.

Apêndice.

Bibliografia.

Inclui: siglas, símbolos, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Aerodinâmica Veicular. 2. Túnel de Vento. 3. Coeficiente de Arrasto. 4. Corpos Rombudos. 5. Eficiência Energética.

I. Mariano, Felipe Pamplona , orient. II. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE COMPUTAÇÃO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ao primeiro dia do mês de julho do ano de dois mil e vinte seis iniciou-se a sessão pública de defesa do Projeto Final de Curso (PFC) intitulado “**Análise experimental da aerodinâmica de um veículo coletivo de transporte de passageiros em túnel de vento**”, de autoria de **Kaique Caetano Cesário Rodrigues**, do curso de Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia Elétrica (EMC), Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás (UFG). Os trabalhos foram instalados pelo professor Felipe Pamplona Mariano (EMC/UFG) com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Andreia Aoyagui Nascimento (EMC/UFG) e Leonardo de Queiroz Moreira (EMC/UFG). Após a apresentação, a banca examinadora realizou a arguição do estudante. Posteriormente, de forma reservada, a Banca Examinadora atribuiu a nota final de **9,2**, tendo sido o PFC considerado **aprovado**.

Proclamados os resultados, os trabalhos foram encerrados e, para constar, lavrou-se a presente ata que segue assinada pelos Membros da Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Andreia Aoyagui Nascimento, Professora do Magistério Superior**, em 01/07/2026, às 13:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo De Queiroz Moreira, Professor do Magistério Superior**, em 01/07/2026, às 13:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Pamplona Mariano, Professor do Magistério Superior**, em 01/07/2026, às 13:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6301614** e o código CRC **CF62B14D**.

*“[...] os olhos nunca se saciam de ver, nem os ouvidos de ouvir.
O que foi tornará a ser, o que foi feito se fará novamente; não há nada novo debaixo do sol...”*

(BÍBLIA, Eclesiastes 1:8-9)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por me fornecer a sabedoria, a força e a saúde necessárias para perseverar e concluir esta etapa.

À minha família, pois esta conquista só foi possível graças ao apoio constante que recebi. Agradeço ao meu pai, Caetano, à minha mãe, Taiz, e à minha irmã, Lays. Estendo minha gratidão à minha avó Vitalina, ao Afrânio e à Fabiana. Em memória, expresso minha saudade e meu muito obrigado ao meu avô Auro e à minha avó Wilma, guardando comigo a convicção de que ele estaria muito orgulhoso deste momento. Agradeço também a todos os meus outros familiares.

Aos meus amigos, que me deram forças para continuar, dividiram as horas de estudo e compartilharam os bons momentos. A experiência de viver em Goiânia só foi realmente boa porque tive a companhia de vocês. Faço uma menção especial aos amigos do Terço dos Homens, pelo companheirismo e parceria constante ao longo desta trajetória, e a todos os amigos que de alguma forma fizeram parte desta caminhada.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Felipe Pamplona, pelo apoio, pela orientação precisa, pelo tempo disponibilizado para a elaboração dos projetos e na condução dos experimentos. Ao técnico Anderson Girandi, pelo auxílio essencial na montagem e nas medições experimentais no laboratório.

À Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás (EMC/UFG), pelo suporte estrutural e acadêmico oferecido ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Por fim, à equipe de extensão Optimus FSAE, pela contribuição prática e técnica na minha formação em engenharia.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar experimentalmente o comportamento aerodinâmico de um veículo pesado de transporte de passageiros, visando determinar seus coeficientes adimensionais e quantificar o impacto da resistência ao avanço no consumo de combustível e nas emissões de dióxido de carbono (CO_2). A metodologia foi dividida em abordagens qualitativas e quantitativas conduzidas em túnel de vento. Qualitativamente, empregou-se a injeção de fumaça para visualizar a topologia do escoamento, evidenciando o descolamento da camada limite e a formação de uma ampla esteira turbulenta inerente à geometria de corpos rombudos. Quantitativamente, as forças incidentes foram aferidas sobre um modelo em escala reduzida inspirado no ônibus rodoviário Marcopolo Paradiso New G7 1800 DD. Os dados adquiridos passaram por tratamento estatístico de média temporal e refinamento analítico pela superposição de forças, isolando o arrasto parasita do suporte de fixação. Os resultados demonstraram o alcance do regime de independência do Número de Reynolds para escoamentos superiores a $13,9 \text{ m/s}$, consolidando um coeficiente de arrasto de 0,7480. Pela análise adimensional incompleta do modelo veicular para o protótipo real operando em velocidade de cruzeiro de 90 km/h indicou uma exigência de potência de 119,43 kW, resultando em uma autonomia estimada de $2,98 \text{ km/L}$ e um fator de emissão de $0,8998 \text{ kgCO}_2/\text{km}$. Conclui-se que o arrasto aerodinâmico constitui a parcela dominante das perdas energéticas, e que a obtenção experimental destes parâmetros fornece subsídios essenciais para o aprimoramento geométrico de frotas comerciais, promovendo a redução de custos logísticos e a mitigação do impacto ambiental.

Palavras-chave: Aerodinâmica veicular; Túnel de vento; Coeficiente de arrasto; Corpos rombudos; Eficiência energética;

ABSTRACT

This study aims to experimentally analyze the aerodynamic behavior of a heavy passenger vehicle, aiming to determine its dimensionless coefficients and quantify the impact of aerodynamic drag on fuel consumption and carbon dioxide (CO_2) emissions. The methodology was divided into qualitative and quantitative approaches conducted in a wind tunnel. Qualitatively, smoke injection was employed to visualize the flow topology, highlighting boundary layer separation and the formation of a large turbulent wake inherent to bluff bodies. Quantitatively, the incident forces were measured on a scaled model inspired by the Marcopolo Paradiso New G7 1800 DD coach. The acquired data underwent time-averaged statistical treatment and analytical refinement through force superposition, isolating the parasitic drag from the mounting support. The results demonstrated that the Reynolds number independence regime was reached for flows above $13,9 \text{ m/s}$, consolidating a drag coefficient of 0.7480 . An incomplete dimensionless analysis extrapolating the scaled model to the full-size prototype operating at a cruising speed of 90 km/h indicated a power requirement of $119,43 \text{ kW}$, resulting in an estimated fuel economy of $2,98 \text{ km/L}$ and an emission factor of $0,8998 \text{ kgCO}_2/\text{km}$. It is concluded that aerodynamic drag constitutes the dominant portion of energy losses, and that the experimental obtainment of these parameters provides essential data for the geometric refinement of commercial fleets, promoting the reduction of logistical costs and the mitigation of environmental impacts.

Keywords: Vehicle aerodynamics; Wind tunnel; Drag coefficient; Bluff bodies; Energy efficiency.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS		X
LISTA DE FIGURAS		XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS		XIII
1	Introdução	1
1.1	ESCOAMENTO SOBRE VEÍCULOS.....	1
1.2	JUSTIFICATIVA.....	1
1.3	OBJETIVOS	2
1.3.1	Objetivo Geral	2
1.3.2	Objetivo Específicos	2
2	Fundamentação Teórica.....	3
2.1	ESCOAMENTO SOBRE VEÍCULOS.....	5
2.2	AERODINÂMICA EXPERIMENTAL SOBRE VEÍCULOS	6
2.3	TÉCNICAS QUALITATIVAS DE VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO.....	7
2.4	MEDIÇÃO DE FORÇAS E TRATAMENTO DE DADOS TURBULENTOS	8
2.5	COEFICIENTES DE FORÇAS AERODINÂMICOS.....	9
2.6	DINÂMICA VEICULAR E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	11
3	Revisão bibliográfica	14
4	Metodologia	16
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MODELO EM ESCALA.....	16
4.2	ANÁLISE ADIMENSIONAL INCOMPLETA.....	18
4.3	APARATO EXPERIMENTAL.....	20
4.3.1	Túnel de Vento Subsônico	20
4.3.2	Sistema de Tomada de Pressão no Convergente.....	22
4.3.3	Balança Aerodinâmica e Instrumentação de Forças.....	23
4.3.4	Equipamentos de Visualização Qualitativa de Fluxo.....	23
4.4	SISTEMA DE MONTAGEM E SIMULAÇÃO DO PLANO DE SOLO.....	24
4.5	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	28
4.5.1	Calibração Estática da Balança Aerodinâmica	28
4.5.2	Aquisição de Dados Quantitativos (Forças Aerodinâmicas)	29
4.5.3	Aquisição de Dados Qualitativos (Visualização do Escoamento).....	30
5	Resultados.....	31
5.1	VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO	31

5.1.1	Escoamento na Região Frontal e Ponto de Estagnação	31
5.1.2	Escoamento Longitudinal sobre o Teto e Desenvolvimento da Camada Limite	32
5.1.3	Separação do Escoamento e Formação da Esteira Turbulenta na Traseira.....	34
5.2	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS	35
5.2.1	Consolidação das Rodadas de Arrasto e Sustentação	35
5.2.2	Mapeamento do Diferencial de Pressão e Matriz Principal	37
5.3	PROCESSAMENTO DOS PARÂMETROS AERODINÂMICOS E DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES	38
5.3.1	Independência no Número de Reynolds e Validação	40
5.4	ANÁLISE GRÁFICA DOS ESFORÇOS E COEFICIENTES AERODINÂMICOS...	41
5.4.1	Comportamento Parabólico das Forças Aerodinâmicas	41
5.4.2	Independência de Reynolds e Estabilização dos Coeficientes Aerodinâmicos.....	42
5.5	ESTIMATIVA DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL E IMPACTO AMBIENTAL ..	44
5.5.1	Parâmetros e Condições de Contorno	45
5.5.2	Cálculo das Forças de Resistência.....	46
5.5.3	Exigência de Potência e Consumo de Combustível	46
5.5.4	Emissões de <i>CO2</i> Específicas.....	47
5.5.5	Análise dos Resultados Finais	47
6	Conclusão	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Valores para igualar o número de Reynolds entre o protótipo e o modelo.	19
Tabela 4.2. Especificações técnicas nominais do Túnel de Vento Aeroalcool AA-TVSH1c..	21
Tabela 5.1. Matriz de consolidação dos cinco testes experimentais para o Arrasto.	36
Tabela 5.2. Matriz de consolidação dos cinco teste experimentais para a Sustentação.	37
Tabela 5.3. Matriz Principal agrupando variáveis de pressão e massa específica do ar.	38
Tabela 5.4. Parâmetros cinemáticos do escoamento (Pressão, Velocidade e Reynolds) em função da rotação do túnel.	39
Tabela 5.5. Forças e coeficientes aerodinâmicos adimensionais.	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Distribuição de pressão e descolamento das linhas de corrente sobre a superfície de um ônibus	4
Figura 2.2. Linhas de emissão sobre o veículo na seção de teste de um túnel de vento.	5
Figura 2.3. Tecnologia de interseção por feixe de laser para a visualização de processos de escoamento ao redor de um veículo.	8
Figura 2.4. Comportamento oscilatório das forças aerodinâmicas devido à formação de esteira turbulenta em corpos rombudos.	9
Figura 2.5. Aplicação de defletor aerodinâmico frontal em veículo de transporte de carga pesado	10
Figura 4.1. Embalagem do modelo Viação Petroleum.....	16
Figura 4.2. Ônibus real Marcopolo Paradiso New G7 1800 DD.	17
Figura 4.3. Vista lateral do modelo Viação Petroleum (Escala 1:43).	17
Figura 4.4. – Túnel de Vento Aeroalcool Aerodesign Modelo AA-TVSH1c.....	21
Figura 4.5. Gerador de fumaça Tecport Modelo F950.....	24
Figura 4.6. Vista superior da base do suporte para ensaio.	25
Figura 4.7. Projeto digital do calço de suporte dos pneumáticos do modelo em escala	25
Figura 4.8. Posicionamento do modelo sobre a chapa de suporte de 1 mm e calços poliméricos dentro do túnel de vento.	27
Figura 4.9. Peso inserido ao experimento para calibração do eixo de sustentação com aplicação direta de massa-padrão.	29
Figura 4.10. Visualização do escoamento em torno do modelo iluminado por plano laser verde	31
Figura 5.1. Escoamento de fumaça sobre o modelo com feixe de laser na frente do veículo..	32
Figura 5.2. Escoamento de fumaça sobre o modelo com feixe de laser na seção central do veículo.	33
Figura 5.3. Escoamento de fumaça sobre o modelo com feixe de laser na traseira do veículo.	34
Figura 5.4. Variação da massa em função do tempo e respectiva média temporal para uma velocidade estabelecida.	36
Figura 5.5. Forças de Arrasto e Sustentação em função da velocidade do escoamento.	42
Figura 5.6. Estabilização do coeficiente de arrasto (C_A) em função do Número de Reynolds	43
Figura 5.7. Coeficiente de sustentação (C_S) em função do Número de Reynolds.....	43

Figura 5.8. Comportamento comparativo dos (CA e CS) em função de Re	44
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

CG	Centro de Gravidade
RPM	Rotações Por Minuto

SÍMBOLOS

A	Área frontal do veículo
C_A	Coeficiente de arrasto
C_{rr}	Coeficiente de Resistência ao Rolamento
C_S	Coeficiente de sustentação
η	Eficiência da Transmissão
F_{aero}	Força aerodinâmica
F_{rol}	Força de rolamento
F_{total}	Força total
ρ	Massa específica
ρ_{diesel}	Massa específica do diesel
Re	Número de Reynolds
P_{AC}	Potência do ar-condicionado
P_{req}	Potência requerida
P	Pressão no escoamento
V_{∞}	Velocidade do escoamento
V	Velocidade do fluido
μ	Viscosidade dinâmica do ar

1 INTRODUÇÃO

A busca contínua por eficiência energética e a necessidade de adequação às normas ambientais impulsionam o desenvolvimento da engenharia automotiva contemporânea. No setor de transporte rodoviário, projetar veículos capazes de operar com menor consumo de combustível tornou-se um requisito técnico e econômico imperativo. O estudo da interação mecânica entre o veículo e o ar no qual ele se desloca constitui um dos princípios fundamentais para compreender, quantificar e mitigar as perdas de energia durante a operação em rodovias.

1.1 Escoamento sobre veículos

O estudo do comportamento dos fluidos em movimento e de sua interação com superfícies sólidas é a base da fluidodinâmica. Conforme descrito por White (2007) o escoamento de um fluido sobre um corpo gera uma distribuição de pressões e tensões de cisalhamento que resultam nas componentes de força de arrasto e sustentação. Na aplicação automotiva, o arrasto aerodinâmico atua como uma barreira física à eficiência do movimento. Çengel e Cimbala (2015) demonstram que a força de resistência do ar possui um crescimento proporcional ao quadrado da velocidade do escoamento, exigindo a maior parcela da potência mecânica do motor em regimes operacionais de rodovia.

Diferentemente de aplicações aeronáuticas, os veículos de transporte de passageiros são limitados por regulamentações dimensionais e necessidades de volume interno, o que os caracteriza fluidodinamicamente como corpos rombudos. Schuetz (2016) estabelece que a interrupção das linhas da carroceria desses veículos, em especial na seção traseira, força o descolamento da camada limite e a formação de uma esteira turbulenta de baixa pressão. Essa topologia de escoamento faz com que o arrasto de forma atue como a componente dominante da resistência aerodinâmica total.

1.2 Justificativa

O transporte rodoviário atua como a base logística de mobilidade, operando sob dependência da queima de combustíveis fósseis. As frotas de transporte intermunicipal enfrentam o desafio de reduzir custos operacionais, compostos em sua maior parte pelos gastos com óleo diesel, e de se adequar a metas de mitigação de gases de efeito estufa.

Como a força aerodinâmica é a principal fonte de dissipação energética de um ônibus em velocidade de cruzeiro (SCHUETZ, 2016), quantificar as perdas associadas à geometria de sua carroceria é uma etapa do projeto automotivo. A obtenção experimental dos coeficientes

aerodinâmicos fornece a base de dados para o dimensionamento térmico do motor e embasa a implementação de alterações geométricas e apêndices aerodinâmicos.

O estudo prático em túnel de vento converte a teoria da mecânica dos fluidos em métricas aplicáveis, aliando a viabilidade do transporte à sustentabilidade ambiental por meio da redução das emissões de dióxido de carbono (CO_2).

Com isso, o foco do trabalho é validar uma metodologia acessível e rigorosa, provando que é possível extrair o coeficiente aerodinâmico real e confiável utilizando uma miniatura comercial acoplada a uma placa divisora.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar experimentalmente o comportamento aerodinâmico de um modelo em escala de um veículo pesado de transporte de passageiros em túnel de vento, determinar seus coeficientes adimensionais e quantificar o impacto da resistência aerodinâmica no consumo de combustível e nas emissões de CO_2 em operação de cruzeiro.

1.3.2 Objetivo Específicos

- Realizar ensaios qualitativos de visualização do escoamento com injeção de fumaça para mapear o descolamento da camada limite.
- Mensurar as forças de arrasto e sustentação sobre o modelo através de uma balança aerodinâmica para múltiplas velocidades de escoamento, aplicando o tratamento estatístico de médias temporais.
- Determinar o coeficiente de arrasto (C_A) e o coeficiente de sustentação (C_S).
- Estimar, por meio de equações da dinâmica veicular, a potência mecânica requerida, a autonomia e a taxa de emissão de CO_2 para o protótipo real.

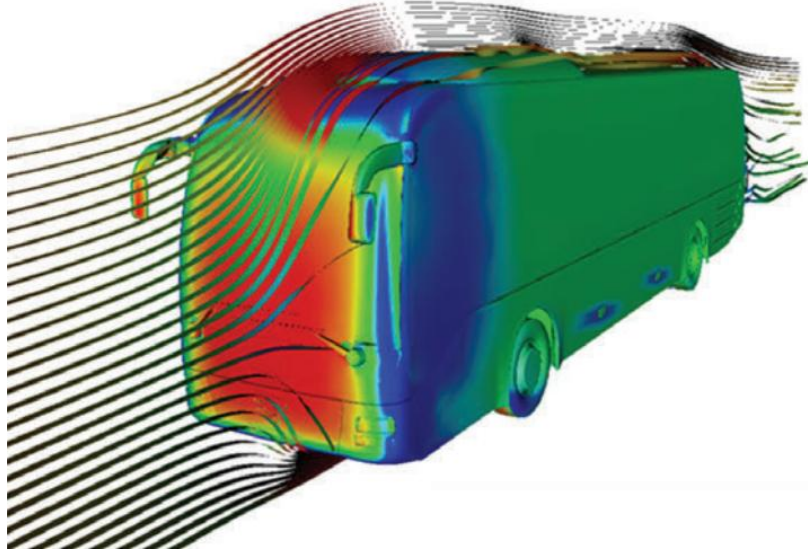
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fluidodinâmica dedica-se ao estudo do comportamento dos fluidos em movimento e de sua interação com corpos sólidos imersos. Quando um objeto se desloca através de um fluido, ou quando um fluido escoar ao redor de uma estrutura, ocorre uma transferência de quantidade de movimento que gera forças na superfície de contato. Na engenharia, a força resultante exercida pelo fluido sobre o corpo é decomposta em duas componentes fundamentais em relação à direção do escoamento livre: o arrasto, que atua paralelamente à direção do vento não perturbado, e a sustentação, que atua na direção perpendicular (WHITE, 2007).

A natureza dessas forças é regida pela condição de não escorregamento, na qual as partículas de fluido em contato direto com a superfície sólida adquirem a velocidade do próprio corpo. Esse fenômeno dá origem à camada limite, conceito introduzido por Ludwig Prandtl que define uma região estreita adjacente à superfície onde os efeitos viscosos do fluido são significativos e os gradientes de velocidade são elevados. Fora desta região, o escoamento pode ser tratado como invíscido, onde a influência da viscosidade torna-se desprezível (WHITE, 2007).

O arrasto total experimentado por um objeto submerso é a soma de duas contribuições distintas: o arrasto de atrito e o arrasto de pressão, também conhecido como arrasto de forma. O arrasto de atrito decorre das tensões de cisalhamento que atuam tangencialmente à superfície do corpo, sendo predominante em objetos de geometria aerodinâmica. Já o arrasto de pressão resulta das tensões normais e da distribuição desigual de pressão entre as faces frontal e posterior do objeto. Em corpos rombudos, a camada limite frequentemente se separa da superfície devido a gradientes adversos de pressão, criando uma zona de baixa pressão e alta turbulência na retaguarda denominada esteira, o que eleva consideravelmente o arrasto de pressão (WHITE, 2007). Esse fenômeno característico de distribuição de pressões e o descolamento das linhas de corrente na região posterior podem ser claramente visualizados na Figura 2.1.

Figura 2.1. Distribuição de pressão e descolamento das linhas de corrente sobre a superfície de um ônibus



Fonte: Schuetz (2016).

Para a caracterização técnica e comparação entre diferentes geometrias, a força de resistência é expressa por meio de um parâmetro adimensional fundamental conhecido como coeficiente de arrasto (C_A)

Com esse coeficiente é possível analisar a eficiência aerodinâmica de um corpo independentemente de sua escala ou da velocidade do escoamento, sendo definido matematicamente pela Equação 2.1:

$$C_A \equiv \frac{F_A}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A}, \quad (2.1)$$

onde: F_A é a força de arrasto em [N], ρ é a massa específica em [kg/m^3], V é a velocidade em [m/s] e A é a área de referência do corpo em [m^2].

De maneira análoga, a força aerodinâmica que atua perpendicularmente ao escoamento livre é parametrizada pelo coeficiente de sustentação (C_S). Este coeficiente é fundamental para avaliar a tendência do fluido em gerar forças de elevação ou de adesão do veículo em relação à via, sendo expresso pela Equação 2.2:

$$C_S \equiv \frac{F_S}{\frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot A}, \quad (2.2)$$

onde F_S é a força de sustentação em [N], mantendo-se as demais variáveis equivalentes às descritas para a equação de arrasto.

A magnitude deste coeficiente é influenciada diretamente pela geometria do objeto e pelo número de Reynolds, que dita o regime de escoamento e o comportamento da camada limite.

Compreender esses fenômenos em corpos rombudos é o estágio inicial essencial para a análise de veículos terrestres, onde o controle da separação do escoamento e a minimização da esteira turbulenta são os principais objetivos do projeto.

2.1 Escoamento sobre veículos

Diferentemente das aplicações aeronáuticas clássicas, nas quais as geometrias são concebidas para serem estritamente aerodinâmicas com o intuito de minimizar o arrasto de pressão e evitar a separação do escoamento, os veículos terrestres operam sob um conjunto distinto de restrições de projeto. Automóveis, ônibus e caminhões são projetados primordialmente para atender a requisitos funcionais de volume interno, capacidade de carga, visibilidade e regulamentações dimensionais. Consequentemente, essas formas veiculares são classificadas fluidodinamicamente como corpos rombudos.

A interrupção abrupta da geometria, especialmente na seção traseira destes veículos, impede que a camada limite permaneça aderida à superfície, resultando em um descolamento prematuro do escoamento. Esse fenômeno gera uma região de esteira turbulenta e baixa pressão na traseira, fazendo com que o arrasto de pressão seja a componente dominante na resistência aerodinâmica total do veículo (SCHUETZ, 2016). A Figura 2.2 ilustra este descolamento prematuro do escoamento e a consequente formação da esteira turbulenta na seção traseira de um veículo terrestre.

Figura 2.2. Linhas de emissão sobre o veículo na seção de teste de um túnel de vento.



Fonte: Schuetz (2016).

Uma característica fundamental que distingue a aerodinâmica veicular do escoamento externo genérico é a proximidade do corpo com uma superfície delimitadora fixa, o solo. O escoamento de ar ao redor de um veículo não ocorre em um espaço livre infinito, mas é influenciado pela interação com a estrada. Esse cenário, conhecido como efeito solo, impõe uma restrição assimétrica ao fluxo, acelerando o ar que escoava sob o chassi e altera a distribuição

tridimensional de pressões ao redor de toda a carroceria. Essa interação afeta não apenas a magnitude do arrasto, mas é a principal responsável pela geração de forças de sustentação (positivas ou negativas) que impactam diretamente a aderência dos pneus e a estabilidade direcional do veículo em altas velocidades (SCHUETZ, 2016).

No contexto do desempenho dinâmico e da eficiência energética, a força aerodinâmica atua em conjunto com a resistência ao rolamento dos pneus e as perdas no trem de força. Enquanto a resistência ao rolamento se mantém relativamente constante em diferentes faixas de velocidade, a força de arrasto cresce proporcionalmente ao quadrado da velocidade do escoamento, vide Equação 2.1. A otimização aerodinâmica de tais veículos concentra-se, portanto, em gerenciar os gradientes de pressão na porção frontal para suavizar o desenvolvimento inicial da camada limite e, aplicar modificações geométricas na traseira para reduzir o volume da esteira (SCHUETZ, 2016).

2.2 Aerodinâmica experimental sobre veículos

Apesar do contínuo avanço e da confiabilidade das ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), a avaliação experimental permanece como o método de referência na aerodinâmica veicular para a determinação das forças atuantes, validação de modelos numéricos e otimização de geometrias complexas. A principal ferramenta utilizada para esse propósito é o túnel de vento, um equipamento projetado para simular o movimento relativo entre o veículo e a massa de ar sob condições controladas. Em ensaios experimentais, o veículo ou seu modelo em escala é acoplado a uma balança aerodinâmica sensível e mantido estacionário na seção de testes, enquanto o escoamento de ar é forçado ao seu redor, reproduzindo as interações e a transferência de quantidade de movimento de uma condição real de rodagem em estrada (SCHUETZ, 2016).

A realização de ensaios com modelos em escala reduzida, como miniaturas de veículos comerciais e ônibus, exige utilizar os princípios das semelhanças dinâmica, cinética e dinâmica garantindo que os resultados dimensionais obtidos na bancada possam ser extrapolados para o veículo em tamanho real, denominado protótipo. O parâmetro de similaridade primordial na aerodinâmica incompressível é o número de Reynolds (Re), que quantifica a relação entre as forças inerciais e as forças viscosas do escoamento, sendo definido matematicamente pela Equação 2.3:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}, \quad (2.3)$$

onde L é a dimensão linear característica do veículo, em [m] e μ é o coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido em [Pa.s].

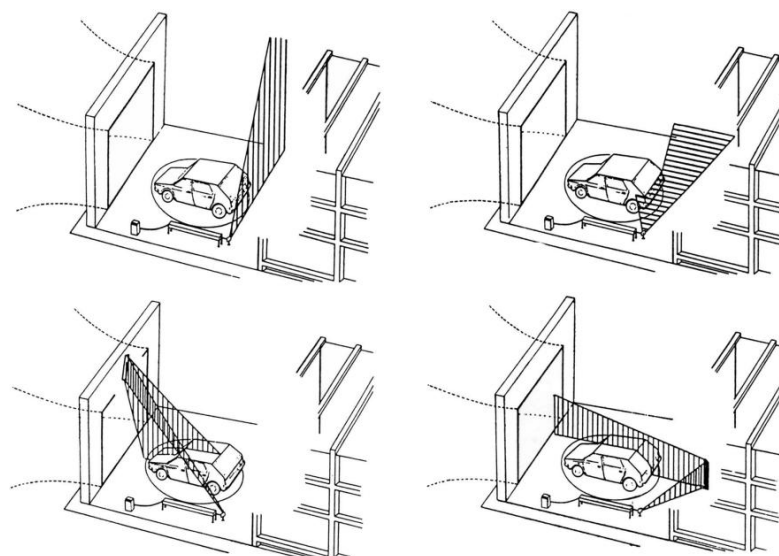
Para assegurar a equivalência estrita dos coeficientes aerodinâmicos entre o modelo e o protótipo, a miniatura, geometricamente semelhante, deveria operar no mesmo número de Reynolds que o veículo real. Contudo, devido à redução do comprimento característico no modelo, a velocidade do ar precisaria ser aumentada a níveis supersônicos para compensar a equação, o que é fisicamente impossível ou financeiramente inviável na maioria dos túneis de vento. Felizmente para o projeto de veículos de grande porte, as formas rombudas dos ônibus apresentam pontos de separação da camada limite que são mecanicamente fixados pelas próprias arestas vivas e cantos abruptos da carroceria. Essa característica faz com que a esteira traseira e, por consequência, o coeficiente de arrasto, tornem-se relativamente independentes do número de Reynolds a partir de um valor limite, viabilizando cientificamente os ensaios de arrasto com modelos em escala reduzida (WHITE, 2007; SCHUETZ, 2016).

2.3 Técnicas Qualitativas de Visualização de Escoamento

A compreensão integral da fluidodinâmica ao redor de um veículo requer a correlação entre os dados numéricos de força e a topologia física do escoamento. Para este fim, as técnicas qualitativas de visualização desempenham um papel metodológico central em ensaios de túnel de vento, permitindo a observação macroscópica de fenômenos que as balanças aerodinâmicas registram apenas de forma indireta (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

Entre as metodologias consolidadas para testes em baixa velocidade, destaca-se a injeção de traçadores fluidos, como a fumaça, a montante do modelo. As partículas do traçador acompanham o escoamento, tornando a trajetória do escoamento visível a olho nu. Para aprimorar o contraste e permitir a análise seccional, esta técnica é frequentemente conjugada ao uso de um feixe de laser transversal, que atua como um plano de luz (plano de corte óptico). Esta iluminação direcional isola uma fatia bidimensional do campo tridimensional, evitando a sobreposição visual das linhas de fumaça, isso é possível ser visto na Figura 2.3 (SCHUETZ, 2016).

Figura 2.3. Tecnologia de interseção por feixe de laser para a visualização de processos de escoamento ao redor de um veículo.



Fonte: Schuetz (2016).

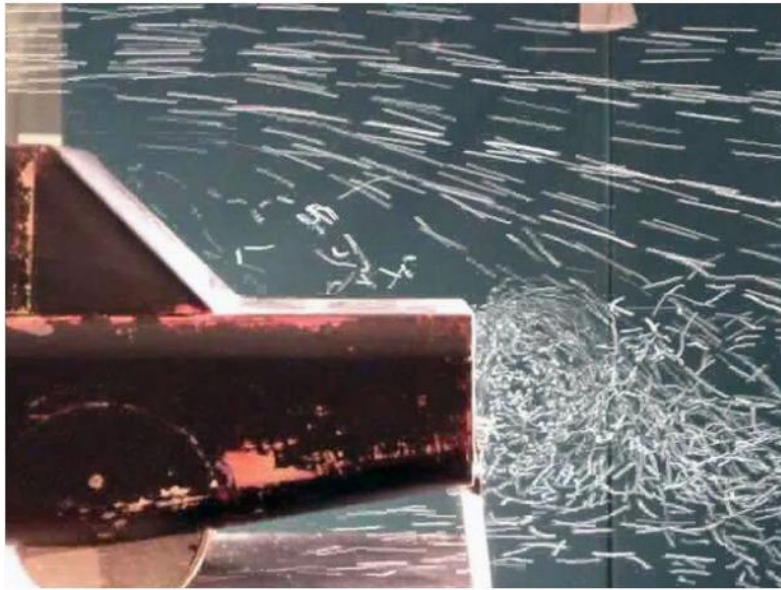
A aplicação desta técnica em modelos automotivos rombudos viabiliza o mapeamento direto da cinemática do fluido. Por meio das imagens geradas, torna-se possível identificar o ponto exato de estagnação na face frontal, atestar a aderência ou o espessamento da camada limite ao longo do teto e, sobretudo, documentar o ponto de descolamento do fluido na região a jusante do veículo, que dá origem à esteira de recirculação (SCHUETZ, 2016). Esta comprovação visual é a etapa teórica que embasa e justifica a magnitude do arrasto de pressão colhido quantitativamente nos outros ensaios.

2.4 Medição de Forças e Tratamento de Dados Turbulentos

A aquisição quantitativa das cargas aerodinâmicas sobre modelos em escala é executada por meio de balanças aerodinâmicas piezelétricas ou do tipo *strain gauge*. No entanto, a leitura destes instrumentos em ensaios de veículos comerciais exige um tratamento estatístico apropriado devido à natureza transiente da mecânica dos fluidos envolvida. Em corpos rombudos, a separação abrupta da camada limite na geometria traseira origina uma zona de vórtices alternados, classicamente conhecida como esteira de Von Kármán (WHITE, 2007).

A formação e o desprendimento contínuo destas estruturas turbilhonares fazem com que o campo de pressão na jusante do veículo, como observada na Figura 2.4, seja instável no tempo. Por consequência, a força aerodinâmica global incidente sobre o modelo nunca é perfeitamente estática; ela oscila em torno de um patamar referencial.

Figura 2.4. Comportamento oscilatório das forças aerodinâmicas devido à formação de esteira turbulenta em corpos rombudos.



Fonte: Schuetz (2016).

Para contornar esta variância e extrair parâmetros utilizáveis para projetos de engenharia, estabelece a necessidade de aquisição contínua de dados (amostragem em frequência adequada) durante janelas de tempo predeterminadas. Os dados brutos oscilantes devem ser submetidos a um tratamento estatístico de média temporal aritmética. A aplicação desta técnica de filtragem minimiza a influência das flutuações de alta frequência da esteira e de eventuais vibrações mecânicas do próprio túnel, isolando a componente estacionária da força aerodinâmica. É este valor estabilizado que permite o cálculo fidedigno e repetível dos coeficientes adimensionais do veículo (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

2.5 Coeficientes de Forças Aerodinâmicos

Os ônibus representam uma categoria extrema de corpos rombudos dentro da aerodinâmica veicular, sendo caracterizados por geometrias predominantemente prismáticas, grandes dimensões lineares e uma área frontal significativamente elevada. Devido à necessidade primordial de maximizar o espaço interno para passageiros e atender a limites de largura e comprimento das vias, a liberdade para o design aerodinâmico é severamente limitada. Diferente de automóveis de passeio, onde o escoamento pode ser parcialmente direcionado para contornar a carroceria de forma suave, em ônibus o fluxo de ar encontra uma face frontal quase vertical, o que resulta em uma zona de estagnação centralizada e gradientes de pressão extremamente elevados nas arestas periféricas (SCHUETZ, 2016).

O comportamento da camada limite em ônibus é ditado quase inteiramente pelo raio de curvatura das quinas frontais. Quando essas arestas são excessivamente agudas, a camada limite não consegue contornar a mudança brusca de direção e se separa imediatamente, gerando bolhas de separação nas laterais e no teto que aumentam o arrasto de pressão. Estudos experimentais indicam que o arredondamento estratégico dessas quinas, mesmo que sutil em relação à largura total do veículo, é capaz de reduzir o coeficiente de arrasto (C_A) de forma drástica, pois permite que o escoamento permaneça aderido por uma extensão maior da carroceria antes de atingir a traseira (WHITE, 2007; SCHUETZ, 2016).

Para mitigar a resistência aerodinâmica em veículos pesados, modificações geométricas e acessórios são aplicados tanto na secção frontal quanto na posterior. Na porção posterior do veículo, o desafio aerodinâmico reside na geometria de corte reto da traseira, que impede a recuperação de pressão e resulta no descolamento do fluxo na periferia da face traseira. Isso gera uma esteira turbulenta, caracterizada por uma zona de baixa pressão que atrai o veículo no sentido oposto ao do movimento. A força de arrasto (F_A) em ônibus e caminhões é composta de forma predominante pelo arrasto de base, que é a diferença entre a alta pressão frontal e a baixa pressão exercida pela esteira na face posterior. Para minimizar essas perdas energéticas, a utilização de defletores de ar direciona o escoamento de forma mais eficiente sobre a carroceria, reduzindo o arrasto de forma frontal, conforme ilustra a Figura 2.5. Adicionalmente, em veículos de transporte rodoviário de longa distância, técnicas como pequenas inclinações no teto próximo à traseira e extensores laterais são empregadas para tentar estreitar a esteira e elevar a pressão de base (SCHUETZ, 2016).

Figura 2.5. Aplicação de defletor aerodinâmico frontal em veículo de transporte de carga pesado



Fonte: Schuetz (2016).

Além da geometria externa principal, outros elementos exercem influência não desprezível no desempenho aerodinâmico desses veículos. O escoamento sob o chassi é particularmente caótico em ônibus devido à presença de componentes mecânicos expostos e à grande distância do solo, o que gera vórtices internos que interagem com a esteira traseira. Da mesma forma, as caixas de rodas e os retrovisores externos, devido às suas dimensões, podem contribuir com parcelas significativas para o coeficiente de arrasto total. No desenvolvimento experimental com modelos em escala, a representação fiel dessas características rombudas e o gerenciamento das áreas de separação frontal são fundamentais para que o ensaio em túnel de vento reflita a realidade operacional do veículo.

2.6 Dinâmica Veicular e Eficiência Energética

A avaliação do desempenho energético de um veículo pesado em condições operacionais exige a compreensão do balanço de forças necessário para manter o seu movimento. Para que um ônibus se desloque em velocidade de cruzeiro, o seu grupo motopropulsor deve fornecer energia mecânica suficiente para superar um conjunto de forças de oposição. A equação fundamental da dinâmica longitudinal estabelece que a força de tração nas rodas deve igualar a força de resistência total (F_{tot}), que, em um cenário dinâmico completo, é composta pela resistência aerodinâmica, resistência ao rolamento, resistência gravitacional (em aclives) e inércia de aceleração (GILLESPIE, 1992).

A interação física entre a carroceria e a massa de ar gera um sistema espacial de solicitações mecânicas. As cargas aerodinâmicas incidentes sobre o veículo são convencionalmente decompostas em um sistema de coordenadas ortogonais, resultando em três componentes de força (arrasto longitudinal, sustentação vertical e força lateral) e três momentos (arfagem, rolagem e guinada) (GILLESPIE, 1992).

Embora este sistema espacial afete diretamente a estabilidade direcional, a aderência e o conforto dinâmico, para a avaliação de desempenho energético em regime permanente e velocidade de cruzeiro sobre uma rodovia plana, as componentes de aceleração e inclinação anulam-se. A análise simplifica-se para o eixo longitudinal. Dessa forma, o balanço de forças de oposição concentra-se na soma da resistência aerodinâmica (F_{aero}) e da resistência ao rolamento (F_{rol}).

A resistência aerodinâmica, responsável pela formação da esteira traseira em corpos rombudos, foi matematicamente descrita pela Equação 2.1. Por sua vez, a resistência ao rolamento decorre da histerese elástica dos pneus, que dissipam energia na forma de calor ao

se deformarem continuamente contra o pavimento. Esta força é modelada pela Equação 2.4 (GILLESPIE, 1992):

$$F_{rol} = m \cdot g \cdot C_{rr}, \quad (2.4)$$

onde m representa a massa total do veículo (chassi, carroceria e passageiros), g a aceleração da gravidade e C_{rr} o coeficiente de resistência ao rolamento, um parâmetro empírico dependente da rigidez estrutural do pneu, da pressão de inflação e da rugosidade da via.

Para manter a continuidade do movimento, a potência fornecida pelo motor deve transpor essas barreiras físicas. Contudo, a energia gerada no eixo de manivelas sofre perdas por atrito e inércia ao longo do sistema de transmissão (caixa de câmbio, eixo cardã e diferencial) antes de atingir os pneus, fenômeno quantificado pela eficiência mecânica da transmissão (η). Adicionalmente, veículos de transporte de passageiros impõem demandas energéticas parasitas para alimentar sistemas auxiliares, com destaque para a carga mecânica do compressor do sistema de ar-condicionado de teto (P_{AC}). Assim, a potência mecânica requerida (P_{req}) para manter o veículo em operação é expressa pela Equação 2.5 (BOSCH, 2014):

$$P_{req} = \left[\frac{(F_{aero} + F_{rol}) \cdot V}{\eta} \right] + P_{AC}. \quad (2.5)$$

A Equação 2.5 indica a primazia técnica da aerodinâmica: ao multiplicar a força de arrasto (F_{aero}) pela velocidade de deslocamento (V), a parcela de potência dissipada pelo ar cresce proporcionalmente com a velocidade, consolidando-se como a barreira energética dominante no transporte rodoviário de longo curso.

A conversão dessa exigência mecânica em consumo de combustível é feita através da eficiência térmica do motor. Na engenharia automotiva, utiliza-se o Consumo Específico de Combustível (*Brake Specific Fuel Consumption* – BSFC), que quantifica a massa de combustível consumida por unidade de energia mecânica útil entregue (HEYWOOD, 1988). O fluxo mássico de combustível consumido ($\dot{m}_{comb}$) é obtido por meio da Equação 2.6:

$$\dot{m}_{comb} = P_{req} \cdot BSFC. \quad (2.6)$$

Através da massa específica estipulada para o óleo diesel, este fluxo mássico é convertido em consumo volumétrico horário. Ao correlacionar o volume consumido com a velocidade de translação do veículo, calcula-se a autonomia operacional da frota, expressa em quilômetros por litro (km/L). O impacto ambiental é posteriormente mensurado aplicando-se fatores de emissão baseados na estequiometria da queima do combustível (IPCC, 2006), fornecendo a taxa específica de emissão de dióxido de carbono (CO_2) por quilômetro percorrido. Esta cadeia analítica viabiliza a comprovação quantitativa de que reduções no coeficiente de arrasto (C_A) refletem diretamente na sustentabilidade ambiental e econômica da operação.

Com isso, através da massa específica do diesel, converte-se o consumo mássico para volumétrico (Equação 2.7) e obtém-se a autonomia através da Equação 2.8.

$$\text{Consumo Volumétrico} = \frac{\text{Consumo Mássico}}{\rho_{\text{diesel}}} \quad (2.7)$$

$$\text{Autonomia} = \frac{V_{\text{km/h}}}{\text{Consumo Volumétrico}} \quad (2.8)$$

Por fim, o impacto ambiental direto atrelado ao veículo é quantificado relacionando-se o fator de conversão de carbono do diesel com a autonomia calculada (Equação 2.9):

$$\text{Emissão} = \frac{2,68}{\text{Autonomia}} \quad (2.9)$$

A viabilidade dos ensaios em túnel de vento com escalas reduzidas apoia-se no conceito prático de semelhança incompleta. Fox, McDonald e Pritchard (2014) elucidam este princípio ao analisarem dados experimentais de um modelo de ônibus em escala 1:16. Os autores demonstram que, na prática laboratorial, a exigência teórica de igualar o Número de Reynolds do modelo ao do protótipo em tamanho real demandaria velocidades de escoamento fisicamente inatingíveis na maioria dos equipamentos. Contudo, em virtude da separação mecânica do escoamento em corpos rombudos, o coeficiente de arrasto do modelo aproxima-se de um patamar constante ao ultrapassar um valor mínimo de Reynolds. Atingida esta região de independência dos efeitos viscosos, a condição de semelhança incompleta é validada (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2014).

Além disso, essa literatura apresenta equações importantes para o trabalho como a de força aerodinâmica apresentada na Equação 2.10:

$$F_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_A \cdot A \cdot V^2 \quad (2.10)$$

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desenvolvimento aerodinâmico na indústria automóvel tem sido historicamente impulsionado pela necessidade de conciliar o desempenho dinâmico com a eficiência energética. Ao analisar as práticas aplicadas ao *design* veicular, Ramos (2012) destaca que a otimização aerodinâmica representa uma das alternativas técnicas mais viáveis e de menor custo de implementação para a redução do consumo de combustível e para a mitigação das emissões de dióxido de carbono (CO_2). Num cenário global onde as legislações ambientais de controle de gases de efeito de estufa tornam-se progressivamente mais severas, a redução do coeficiente de arrasto (C_A) assume um papel central no projeto de engenharia.

A diminuição da resistência ao avanço impõe um desafio intrincado aos projetistas automotivos: encontrar o ponto de equilíbrio ótimo entre a maximização do espaço interno habitável — um requisito inerente ao conforto exigido pelos utentes — e a minimização da área frontal externa, que constitui o principal fator geométrico gerador do arrasto. Embora Ramos (2012) concentre a sua análise em veículos menores, esta premissa de conflito volumétrico adquire uma dimensão ainda mais crítica quando extrapolada para os veículos pesados de transporte rodoviário. Em ônibus, o volume interno para acomodação de dezenas de passageiros não pode ser sacrificado, o que força a carroçaria a assumir uma forma quase prismática (corpo rombudo) e torna o tratamento fluido-dinâmico dos seus contornos uma exigência para a viabilidade económica da frota.

O aprofundamento desta análise no segmento de veículos pesados é conduzido por Carregari (2006), que investiga especificamente o escoamento de ar sobre a carroçaria de ônibus. O autor corrobora a classificação destes veículos como corpos rombudos, nos quais o arrasto de pressão sobrepõe-se ao arrasto de atrito. Devido à geometria ditada pelas restrições dimensionais e funcionais, o fluido sofre separação na secção posterior da carroçaria, originando uma zona de recirculação que atua como o mecanismo primário de geração de resistência ao avanço.

Para compreender e quantificar este fenómeno, Carregari (2006) demonstra a pertinência da aplicação de metodologias experimentais em túnel de vento. O mapeamento do campo fluxo, a identificação do ponto de estagnação na face frontal e o estudo da topologia da esteira posterior formam a base empírica requerida para a validação das análises em projetos automotivos. De acordo com o autor, a aquisição experimental de dados de arrasto permite avaliar o impacto das linhas da carroçaria, fornecendo diretrizes para alterações geométricas

voltadas à redução da resistência ao ar e, por conseguinte, à diminuição do consumo energético da frota.

Para a quantificação destas grandezas fluido-dinâmicas, a literatura estabelece o túnel de vento como a ferramenta experimental padrão no setor automotivo. Barlow, Rae e Pope (1999) descrevem os princípios operacionais de ensaios em túneis de vento de baixa velocidade, detalhando as metodologias de instrumentação para a medição de forças incidentes sobre modelos em escala. De acordo com os autores, a aquisição de dados quantitativos exige o acoplamento do modelo a balanças aerodinâmicas, mecanismos projetados para registrar e decompor a força aerodinâmica global nas suas componentes ortogonais de arrasto e sustentação.

A validade dos ensaios em túnel de vento requer a mitigação das interferências físicas do próprio arranjo experimental. Barlow, Rae e Pope (1999) enfatizam a necessidade de isolar os esforços gerados pelo modelo daqueles gerados pelos seus suportes de fixação. Esta abordagem assegura que os coeficientes aerodinâmicos calculados a partir dos dados brutos da balança reflitam exclusivamente a assinatura aerodinâmica da carroceria do veículo, permitindo a extrapolação direta e precisa dos resultados do modelo reduzido para as equações de consumo do protótipo em escala real.

A consolidação dos conceitos apresentados ao longo deste trabalho encontra seu respaldo central na obra de Schuetz (2016). O autor oferece uma abordagem estruturada e didática sobre a aerodinâmica de veículos, figurando como uma literatura firmemente consolidada no setor automotivo. Em virtude da forma analítica com que o texto interliga os fundamentos clássicos da mecânica dos fluidos às práticas experimentais e de projeto em engenharia, este material foi adotado como um dos principais alicerces teóricos e metodológicos para o desenvolvimento e a condução da presente pesquisa.

4 METODOLOGIA

Este capítulo descreve a metodologia experimental adotada para avaliar o comportamento fluidodinâmico de um modelo em escala de um veículo coletivo de transporte de passageiros, conhecido como ônibus. Nas seções a seguir, serão detalhados o objeto de estudo, as especificações técnicas dos equipamentos analíticos utilizados no laboratório, o sistema de montagem desenvolvido para a simulação do plano de solo e, por fim, os procedimentos sistemáticos de ensaio estabelecidos para a coleta e tratamento dos dados qualitativos e quantitativos.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MODELO EM ESCALA

O objeto de estudo selecionado para a análise aerodinâmica consistiu em um modelo físico reduzido de um ônibus. O modelo utilizado é comercialmente catalogado como "Ônibus Viação Petroleum" (Referência 1475), produzido pela fabricante Roma Brinquedos. O veículo possui uma escala de redução nominal de 1:43 como é indicado pela caixa do fabricante visto na Figura 4.1.

Figura 4.1. Embalagem do modelo Viação Petroleum.



Fonte: Próprio Autor.

A concepção geométrica da miniatura comercial utilizada neste estudo não constitui uma réplica exata e licenciada de um veículo específico. Entretanto, a partir de uma análise visual e da comparação de suas linhas de carenagem e proporções, identifica-se que o modelo foi fortemente inspirado no Marcopolo Paradiso New G7 1800 DD (Figura 4.2). Este veículo rodoviário de alta capacidade, montado sobre chassi de três eixos (configuração 6x2), possui dimensões reais em escala natural de 14,00 m de comprimento, 2,60 m de largura e 4,23 m de altura (MARCOPOLO, 2026).

Figura 4.2. Ônibus real Marcopolo Paradiso New G7 1800 DD.



Fonte: Marcopolo.

Ao aplicar o fator geométrico de redução de 1:43 sobre as medidas do veículo real teríamos as dimensões teóricas resultando em 325,58 mm de comprimento, 60,46 mm de largura e 98,37 mm de altura. Contudo, as medições instrumentais realizadas em laboratório sobre o modelo registraram cotas físicas de 300,00 mm de comprimento, 56,75 mm de largura e 81,70 mm de altura máxima.

Essa discrepância dimensional, refletindo um afunilamento em relação à escala teórica, é inerente a adaptações de projeto de moldes de injeção plástica em produtos comerciais (Figura 4.3). Para resguardar o rigor analítico, todas as equações aerodinâmicas e o cálculo da área frontal de referência deste trabalho desprezaram a escala nominal, adotando exclusivamente as dimensões físicas efetivas aferidas na bancada de ensaios.

Figura 4.3. Vista lateral do modelo Viação Petróleo (Escala 1:43).



Fonte: Próprio Autor.

4.2 ANÁLISE ADIMENSIONAL INCOMPLETA

A avaliação experimental do escoamento aerodinâmico em modelos reduzidos exige a validação dos parâmetros adimensionais para garantir que os fenômenos físicos observados em laboratório representem com fidelidade o comportamento do protótipo real. Em escoamentos sobre geometrias veiculares (corpos rombudos), o corpo sólido está sujeito a uma força resultante proveniente do movimento relativo do fluido em seu entorno.

Aplicando o Teorema Pi de Buckingham, o número de variáveis (n) associadas ao problema é igual a cinco (F_A, L, V, ρ, μ). As dimensões primárias associadas a cada uma das n variáveis (massa m , comprimento L e tempo t) são, respectivamente: mLt^{-2} , L , Lt^{-1} , mL^{-3} e $mL^{-1}t^{-1}$. Adotando o número de dimensões primárias $j = 3$, pelo teorema tem-se $k = 2$ grupos adimensionais independentes (π_1 e π_2), obtidos pela subtração $k = n - j$.

As três variáveis repetidas selecionadas para compor ambos os grupos foram o comprimento característico L , a velocidade do escoamento V e a massa específica ρ . A determinação de π_1 resulta da identificação dos coeficientes a, b e c para anular as dimensões primárias, como visto na Equação 4.1:

$$\pi_1 = L^a V^b \rho^c F_A = L^a (Lt^{-1})^b (mL^{-3})^c (mLt^{-2}) = L^0 t^0 m^0 \quad (4.1)$$

Resolvendo o sistema linear para as dimensões m , t e L , obtém-se $a = -2$, $b = -2$ e $c = -1$ Equação 4.2. Dessa forma:

$$\pi_1 = L^{-2} V^{-2} \rho^{-1} F_A = \frac{F_A}{\rho V^2 L^2} = C_A \quad (4.2)$$

De maneira análoga, o grupo π_2 é determinado isolando a influência da viscosidade dinâmica (μ), visto na Equação 4.3:

$$\pi_2 = L^a V^b \rho^c \mu^{-1} = L^a (Lt^{-1})^b (mL^{-3})^c (m^{-1}Lt) = L^0 t^0 m^0 \quad (4.3)$$

A resolução algébrica resulta nos coeficientes $a = 1$, $b = 1$ e $c = 1$. Apresentado na Equação 4.4:

$$\pi_2 = L^1 V^1 \rho^1 \mu^{-1} = \frac{\rho V L}{\mu} = Re \quad (4.4)$$

O teorema Pi de Buckingham assegura que o fenômeno possui uma relação funcional e o Coeficiente de Arrasto é estritamente dependente do Número de Reynolds, onde $C_A = f(Re)$.

A similaridade completa entre o protótipo e o modelo exige que o Número de Reynolds de ambos seja rigorosamente igual ($Re_p = Re_m$) respectivamente. Na Tabela 4.1 são apresentados os parâmetros operacionais do veículo real (Marcopolo Paradiso New G7 1800 DD) a uma velocidade de cruzeiro típica de 90 km/h (25 m/s) e os parâmetros em escala laboratorial.

Tabela 4.1. Valores para igualar o número de Reynolds entre o protótipo e o modelo.

Propriedade	Ônibus Real	Modelo (Escala 1:43)
Comprimento característico L [m]	2,6	0,0567
Massa específica do ar ρ [kg/m ³]	1,073	1,073
Viscosidade dinâmica μ [kg/m*s]	$1,8556 \cdot 10^{-5}$	$1,8556 \cdot 10^{-5}$
Velocidade média do escoamento V [m/s]	25	?

Fonte: Próprio Autor.

Considerando as propriedades do ar, o Número de Reynolds do protótipo na rodovia resulta em $Re_p \approx 3,76 \times 10^6$. Para igualar este valor na seção de testes do túnel de vento com o modelo em escala reduzida, a velocidade exigida (V_m) seria de aproximadamente 1.145 m/s.

Esta velocidade impõe um número de Mach em torno de 3,3 ($Ma > 3$) caracterizando um escoamento supersônico. Sendo incompatível com a aerodinâmica de veículos terrestres, que operam em regime incompressível, a similaridade dinâmica completa torna-se inexecutável.

Diante desta limitação física, o ensaio fundamentou-se na Análise Adimensional Incompleta. Em geometrias de corpos rombudos (*bluff bodies*), os pontos de separação da camada limite são fixados pelas arestas vivas da carroceria. A literatura estabelece que, para escoamentos em regime plenamente turbulento (com Número de Reynolds acima de 10^4), o descolamento da esteira traseira independe dos efeitos viscosos, tornando o coeficiente aerodinâmico (C_A) praticamente constante em relação ao Número de Reynolds (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Para o modelo em escala operando na velocidade máxima segura do túnel de vento, $V_m = 30$ m/s, o Número de Reynolds alcançado é mostrado abaixo utilizando a Equação 2.3:

$$Re_m = \frac{1,073 \times 30 \times 0,0567}{1,8556 \times 10^{-5}} \approx 9,84 \times 10^4 \quad (4.5)$$

Visto que o Re_m obtido na Equação 4.5 supera o limiar crítico de 10^4 , a premissa da Similaridade Incompleta é empiricamente justificada, como apresentado por Fox (2014), atestando a validade dos coeficientes aerodinâmicos levantados neste experimento.

4.3 APARATO EXPERIMENTAL

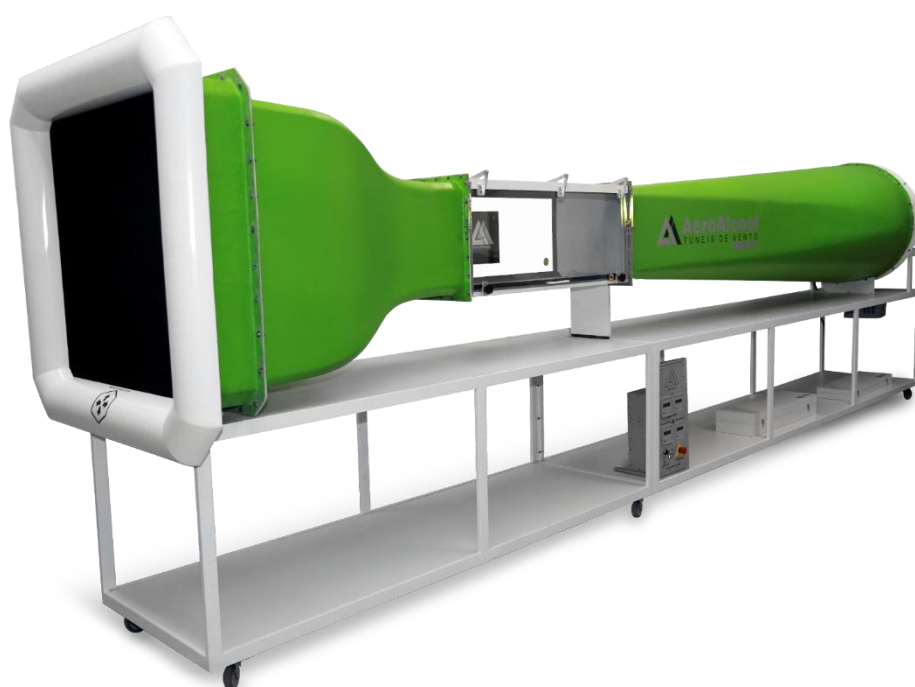
A caracterização do aparato experimental é um pré-requisito fundamental para assegurar a confiabilidade metrológica, a mitigação de erros sistemáticos e a reprodutibilidade de ensaios fluidodinâmicos em ambiente laboratorial (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

Esta seção descreve as especificações técnicas, os limites operacionais e os fundamentos físicos de cada componente mecânico, elétrico e óptico que constituiu a bancada de testes utilizada para o levantamento aerodinâmico do modelo em escala.

4.3.1 Túnel de Vento Subsônico

Os ensaios físicos foram conduzidos no Túnel de Vento Subsônico de circuito aberto e regime de sucção, projetado e manufaturado pela empresa Aeroalcool Aerodesign Modelo AA-TVSH1c ilustrado na Figura 4.4. Segundo a classificação de Çengel e Cimbala (2012), túneis de circuito aberto admitem o ar diretamente da atmosfera do recinto, acelerando-o através de uma colmeia redutora de turbulência e de uma seção de contração convergente antes de direcionar o escoamento para a câmara de testes.

Figura 4.4. – Túnel de Vento Aeroalcool Aerodesign Modelo AA-TVSH1c.



Fonte: Adaptado de Aeroalcool (2026).

A seção de testes deste equipamento possui formato prismático de base quadrada, dotada de paredes laterais transparentes em acrílico estrutural para permitir o acoplamento de sistemas ópticos e o monitoramento visual do ensaio. As dimensões transversais internas medidas em laboratório correspondem a 0,46 m de largura por 0,46 m de altura, totalizando uma área de seção transversal útil de $0,2116 \text{ m}^2$, com um comprimento longitudinal útil de 1,20 m. O gradiente de velocidade é gerado por um exaustor axial multi-pás acionado por um motor elétrico trifásico de indução de 12,5 CV (9,2 kW). O controle da rotação do motor é efetuado por meio de um inversor de frequência escalar acoplado ao painel de comando. Conforme as especificações nominais do fabricante apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Especificações técnicas nominais do Túnel de Vento Aeroalcool AA-TVSH1c.

Parâmetro Operacional	Especificação Técnica
Tipo de Circuito	Aberto (Tipo Sucção / Exaustão Posterior)
Perfil da Seção de Testes	Quadrada (0,46 m x 0,46 m)
Comprimento da Seção de Testes	1,20 m
Potência Nominal do Motor	12,5 CV (9,2 kW)
Rotação Máxima do Ventilador	1760 RPM
Velocidade Máxima do Vento	37,00 m/s
Nível de Intensidade de Turbulência	< 0,5% (para velocidades acima de 12 m/s)

Fonte: Aeroalcool

4.3.2 Sistema de Tomada de Pressão no Convergente

Para a determinação indireta da velocidade do escoamento livre (V_∞) no interior da seção de testes, minimizando as interferências aerodinâmicas provocadas pela introdução de sondas físicas intrusivas na câmara de ensaios (BARLOW; RAE; POPE, 1999), utilizou-se o método de medição por diferença de pressão estática ao longo do bocal convergente do túnel de vento. Este método baseia-se na calibração do cone de contração do próprio equipamento como um elemento primário de medição de vazão.

De acordo com os princípios da mecânica dos fluidos expostos por Fox e McDonald (2011), o comportamento de um escoamento incompressível e permanente através de uma contração geométrica é modelado simultaneamente pela Equação da Continuidade e pelo Princípio de Bernoulli. À medida que o fluido atravessa o bocal convergente, a redução da área da seção transversal de uma área maior (A_1) na entrada para uma área menor (A_2) na saída força um aumento na velocidade linear do ar e, por conservação de energia, uma queda correspondente na pressão estática local.

A relação matemática que modela esse comportamento diferencial permite isolar a velocidade na seção de testes (V_∞ , equivalente a V_2) em função da diferença de pressão estática ($\Delta P = P_1 - P_2$) medida entre a entrada e a saída do convergente, como visto na Equação 4.5.

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2\right]}} \quad (4.5)$$

Para a captura dessa grandeza física, o túnel de vento possui tomadas de pressão estática dispostas em anel (anéis de piezômetro) instaladas de forma faceada e perpendicular ao escoamento na parede interna do circuito: um conjunto posicionado na câmara de estabilização (seção inicial do convergente) e outro posicionado imediatamente antes do início da seção de testes (seção final do convergente). Essas tomadas foram conectadas por meio de tubos de silicone flexíveis ao módulo de aquisição de pressão digital, composto por transdutores piezoresistivos de silício configurados para operar na frequência de amostragem de 6 Hz com faixa de leitura de ± 2000 Pa. O software proprietário da Aeroalcool intercepta os sinais analógicos e computa a velocidade real corrigida do escoamento na planilha de controle.

4.3.3 Balança Aerodinâmica e Instrumentação de Forças

A mensuração direta das forças de arrasto e de sustentação incidentes sobre a miniatura do ônibus foi viabilizada pelo acoplamento do sistema de fixação a uma balança aerodinâmica de bancada do tipo célula de carga da própria Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da UFG. De acordo com a teoria de instrumentação mecânica exposta por White (2011), este dispositivo fundamenta-se na aplicação de extensômetros elétricos de resistência (*strain gauges*) montados em ponte de Wheatstone sobre um corpo de prova metálico deformável. Sob a ação de uma força externa, a deformação mecânica infinitesimal do metal altera a resistência elétrica dos extensômetros, gerando uma variação de tensão elétrica proporcional à carga física aplicada.

Os sinais analógicos de tensão elétrica provenientes dos eixos de arrasto e sustentação da balança foram direcionados a uma placa microcontroladora Arduino de código aberto. A placa atua como uma unidade de processamento local, efetuando a conversão analógico-digital (ADC) dos dados de tensão com resolução de 10 bits. O firmware embarcado no microcontrolador aplica os fatores de calibração obtidos estaticamente e transmite os dados de força tratados via comunicação serial para uma planilha em ambiente Microsoft Excel, permitindo a exibição gráfica e o armazenamento dos dados de força em tempo real.

4.3.4 Equipamentos de Visualização Qualitativa de Fluxo

Para a investigação topológica do escoamento e identificação dos fenômenos de descolamento de camada limite, utilizou-se a técnica de injeção de traçadores gasosos iluminados por plano de luz colimada. O sistema foi composto por um gerador de fumaça por evaporação térmica de solução atomizada de propilenoglicol e água da Fabricante Tecport, Modelo F950 como mostra a Figura 4.5, operando com potência de resistência de 900 W. Este equipamento garante a emissão estável de partículas micrométricas densas que mimetizam as linhas de corrente do ar, com alterações desprezíveis das propriedades locais do escoamento (BRADSHAW, 1970).

Figura 4.5. Gerador de fumaça Tecport Modelo F950.



Fonte: Adaptado Mercado Livre (2026).

Para o seccionamento bidimensional do escoamento ao redor da carroceria, empregou-se um emissor de laser de estado sólido bombeado por diodo (DPSS), da marca iZi, operando no comprimento de onda de 532 nm (espectro verde visível) com potência de saída focada. O feixe de laser foi expandido verticalmente por meio de uma lente cilíndrica divergente, gerando uma lâmina de luz planar de espessura milimétrica sobre a linha de simetria do ônibus. O registro cinemático transiente do escoamento iluminado foi capturado por um smartphone Samsung Galaxy S20 FE colocado em um tripé rígido externo. O sensor óptico do dispositivo foi configurado no modo de captura *Super Slow Motion* a uma taxa de 960 quadros por segundo (fps), permitindo a visualização temporal das estruturas de vórtices de esteira.

4.4 SISTEMA DE MONTAGEM E SIMULAÇÃO DO PLANO DE SOLO

A exatidão na medição de forças aerodinâmicas em modelos veiculares reduzidos depende diretamente do projeto da interface mecânica que conecta o modelo ao sistema de leitura da balança. Para o ensaio de escoamento sobre ônibus, foi desenvolvido um aparato de montagem focado em minimizar o arrasto do suporte, garantir o travamento geométrico do veículo e isolar o escoamento inferior das interferências geradas pelas paredes do túnel de vento.

A base estrutural do suporte foi confeccionada a partir de uma chapa de alumínio com espessura delgada de 1 mm. A escolha deste material e de sua espessura reduzida justifica-se

pela necessidade de garantir rigidez estrutural ao conjunto sem introduzir uma área frontal espessa que pudesse obstruir ou desviar o fluxo de ar que escoar sob o chassi do veículo. Em conformidade com as diretrizes de projeto aerodinâmico para corpos rombudos, a chapa de alumínio foi cortada reproduzindo exatamente a projeção geométrica inferior (*footprint*) do ônibus (Figura 4.7) mitigando assim a ocorrência de efeitos de ponta ou arrasto de forma adicionais que não pertencessem à carroceria original.

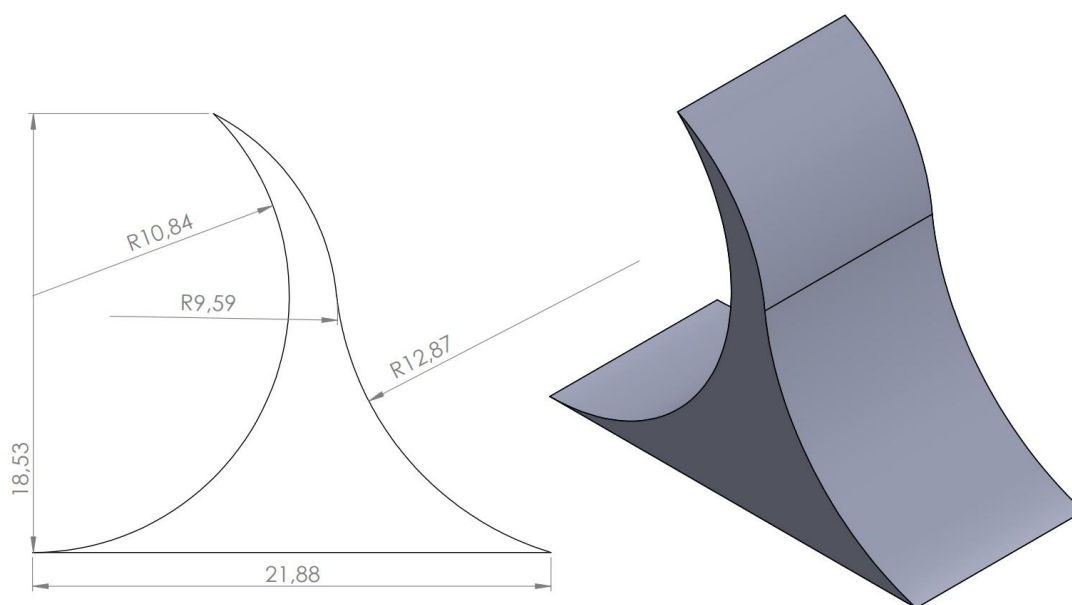
Figura 4.6. Vista superior da base do suporte para ensaio.



Fonte: Próprio Autor.

Para promover a união entre os pneus da miniatura e a chapa de alumínio, foram projetados e fabricados calços estruturais via impressão 3D visto na por deposição de material fundido. Os calços foram dimensionados com largura de 10 mm, igualando-se de forma exata à bitola dos pneus do modelo para evitar projeções para fora da linha da carroceria. O perfil interno dos calços foi feito seguindo a circunferência das rodas, estabelecendo um alojamento cônico que atua como restrição mecânica. As dimensões e desenho técnico da peça se encontram na Figura 4.8.

Figura 4.7. Projeto digital do calço de suporte dos pneumáticos do modelo em escala



Fonte: Próprio Autor.

Como os suportes para fixar o modelo no túnel de vento são peças com dimensões pequenas, exige inserir parâmetros específicos para a impressão 3D, desse modo seguem abaixo as principais informações sobre o processo de impressão 3D com filamento polimérico, ao mesmo tempo, disponibiliza-se no apêndice A o código G desse projeto:

Impressora utilizada:

- Impressora: MINGDA
- Modelo: MD-400D

Foi usado:

- Filamento: PLA Premium Preto da VOOLT 3D
- Diâmetro do filamento: 1,75 mm

Com os seguintes parâmetros principais de impressão:

- Altura da camada: 0,2 mm;
- Tolerância do fatiamento: 0,049 mm;
- Resolução: 0,02 mm;
- Padrão das superfícies superior e inferior: Retilíneo;
- Densidade do preenchimento: 50%;
- Padrão de preenchimento: Grade;
- Velocidade da primeira camada: 50 mm/s;
- Velocidade das outras camadas: 200 mm/s;
- Velocidade do preenchimento sólido: 350 mm/s;
- Borda externa com largura de 4,0 mm;
- Temperatura da mesa: 70 °C;
- Temperatura do bico: 205 °C;
- Fluxo volumétrico máximo: 15 mm³/s.

Devido às restrições geométricas de montagem interna do ônibus na câmara, o método de união dos calços na chapa foi dividido de forma assimétrica: dois calços situados em um dos lados do veículo foram fixados rigidamente à placa por meio de parafusos, enquanto os dois calços contralaterais foram fixados utilizando fita adesiva dupla face de alta adesão. Esta configuração mecânica viabilizou a inserção e o travamento lateral firme do veículo sem a necessidade de forçar a estrutura ou introduzir pré-tensões estáticas nos eixos de leitura da balança aerodinâmica. O modelo do ônibus, vide Figura 4.3, foi posicionado sobre os alojamentos sem a aplicação de nenhum tipo de cola ou elemento aderente químico, garantindo que a transferência da força longitudinal de arrasto sentida pela carroceria fosse transmitida integralmente aos calços por contato mecânico direto.

A determinação do ponto de fixação do aparato na haste da balança aerodinâmica seguiu critérios de distribuição de massa de veículos comerciais pesados. Foi realizado um furo passante na chapa de alumínio, visto na Figura 4.8, posicionado exatamente sobre o eixo de simetria transversal e localizado a uma distância equivalente a 54% do comprimento total do ônibus, calculada a partir da face frontal do veículo correspondendo a 162 mm. Esta coordenada replica a posição do centro de gravidade (CG) típico de chassis rodoviários comerciais, validando a decomposição de forças e assegurando que o momento de arfagem (*pitching moment*) medido pelo sensor não sofresse distorções por braços de alavanca incorretos. O arranjo mecânico completo da placa, dos calços estruturais e do modelo pode ser observado esquematicamente como visto na Figura 4.10.

Figura 4.8. Posicionamento do modelo sobre a chapa de suporte de 1 mm e calços poliméricos dentro do túnel de vento.



Fonte: Próprio Autor.

A interação fluido-estrutura na porção inferior de um veículo terrestre exige a representação adequada da velocidade relativa entre o assoalho e o asfalto (WHITE, 2015). Em túneis de vento equipados com piso estacionário, o atrito viscoso do ar contra as superfícies fixas do canal induz o desenvolvimento de uma camada limite espessa, gerando um perfil de velocidades alterado e mais lento que o esperado abaixo do modelo.

Para contornar este fenômeno sem a necessidade de um piso móvel, o conjunto composto pela chapa de alumínio e o ônibus foi mantido em suspensão vertical no centro da seção de testes, não tangenciando o assoalho original do túnel de vento. Esta abordagem metodológica

fundamenta-se no princípio fluidodinâmico da Placa Divisora (*Splitter Plate*), amplamente documentado por Schuetz (2016). Ao elevar a interface de rodagem para fora da região de parede, o escoamento que incide sobre o assoalho do ônibus passa a operar em regime de escoamento livre e limpo, livre do perfil de velocidades degradado do piso do laboratório, simulando com maior fidelidade a dinâmica de escoamento subveicular observada em rodovias.

4.5 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A confiabilidade dos dados aerodinâmicos obtidos em túneis de vento depende da aplicação de um delineamento experimental, capaz de isolar as variáveis de interesse e mitigar erros sistemáticos inerentes aos equipamentos de medição (BARLOW; RAE; POPE, 1999). Nesta seção, são descritos os protocolos adotados para a calibração da balança aerodinâmica, a rotina de aquisição quantitativa das forças aerodinâmicas e a metodologia de captura qualitativa do escoamento.

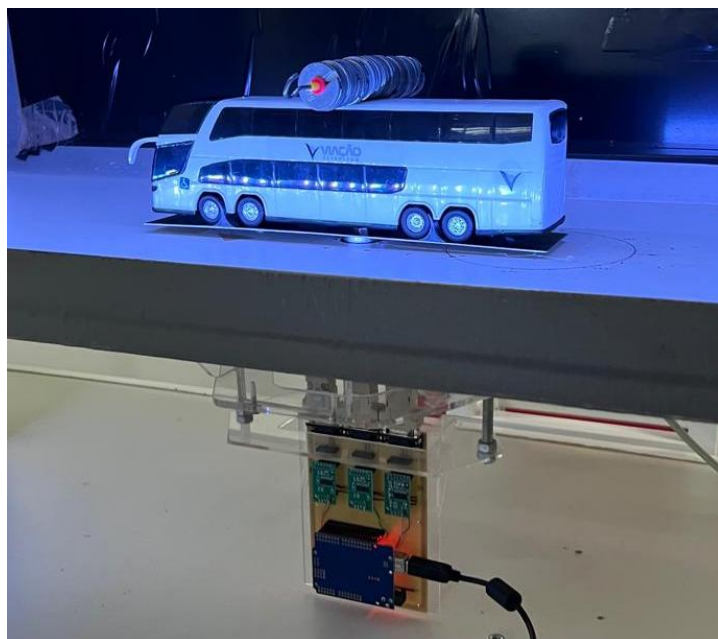
4.5.1 Calibração Estática da Balança Aerodinâmica

Primeiramente, realizou-se o procedimento de tara e calibração estática da balança aerodinâmica e de sua respectiva interface com o microcontrolador Arduino. Devido à sensibilidade do equipamento e à característica das células de carga de ponto único, a leitura simultânea de múltiplos eixos de força pode induzir um fenômeno de interferência mecânica conhecido como *cross-talk* (interferência cruzada), onde o momento fletor gerado por uma força interfere na leitura do eixo perpendicular.

Para eliminar esta incerteza metrológica, a metodologia de ensaio foi dividida em duas baterias de testes estritamente independentes: uma dedicada exclusivamente à Força de Sustentação e outra à Força de Arrasto.

Para a calibração do eixo de sustentação, aplicou-se uma massa-padrão de aferição de 500 g diretamente sobre o aparato de fixação do modelo, ajustando-se o ganho do microcontrolador até que a leitura do software estabilizasse no valor correspondente ao peso exato da massa, procedimento ilustrado na Figura 4.10. Para o eixo de arrasto, empregou-se um sistema de tração com barbante flexível inextensível. Este mecanismo converte a força peso vertical da massa-padrão em uma força de tração puramente horizontal, permitindo o ajuste preciso da leitura de arrasto no sistema de aquisição.

Figura 4.9. Peso inserido ao experimento para calibração do eixo de sustentação com aplicação direta de massa-padrão.



Fonte: Próprio Autor.

4.5.2 Aquisição de Dados Quantitativos (Forças Aerodinâmicas)

A coleta quantitativa de dados foi conduzida sob regime permanente de escoamento. O parâmetro de controle primário do ensaio foi a rotação do motor do túnel de vento, que variou em um espectro predefinido de 300 RPM a 1500 RPM, com incrementos discretos de 100 RPM.

Em estudos fluidodinâmicos, a alteração progressiva e linear da velocidade de um ventilador pode introduzir vícios no escoamento e nos sensores, como a histerese térmica do motor ou a inércia direcional da esteira turbulenta (ÇENGEL; CIMBALA, 2012). Para contornar este viés sistemático, adotou-se o princípio de aleatoriedade no Planejamento de Experimentos. A ordem de execução das rotações não seguiu uma progressão linear ascendente ou descendente, mas foi previamente sorteada, garantindo a independência estatística de cada medição.

Para cada ponto de rotação sorteado, executou-se a seguinte rotina operacional:

1. Ajuste da rotação no inversor do painel de controle e espera para a estabilização do campo de escoamento e pressões na seção de testes.
2. Início simultâneo da gravação das grandezas físicas: as pressões estáticas diferenciais no convergente (para determinação da velocidade, via software da Aeroalcool) e as cargas aerodinâmicas da balança (via microcontrolador Arduino integrado ao Excel).

-
3. O tempo total de registro contínuo para cada velocidade estabilizada foi fixado em 60 segundos. Após transcorridos os primeiros 30 segundos, garantindo o descarte de flutuações transientes de leitura, no sistema é armazenada a média dos últimos 100 pontos de dados coletados, assegurando representatividade estatística.

Este ciclo procedimental foi integralmente repetido 5 vezes para a bateria de medição de Sustentação. Em seguida, após nova etapa de calibração para o eixo longitudinal, a mesma rotina, sorteio aleatório, estabilização e 5 repetições, foi executada para a obtenção da curva de Arrasto.

4.5.3 Aquisição de Dados Qualitativos (Visualização do Escoamento)

Com o objetivo de validar visualmente a topologia do escoamento, identificar os pontos de estagnação e mapear as zonas de descolamento de camada limite, aplicou-se a técnica de injeção de traçadores gasosos (fumaça). Para assegurar a integridade das linhas de corrente sem dispersão turbulenta prematura, a rotação do ventilador foi fixada em 400 RPM, o que corresponde a, aproximadamente, $7,8 \text{ m/s}$.

O feixe do laser verde (532 nm) foi expandido e alinhado ao plano de simetria longitudinal do veículo, iluminando uma "fatia" bidimensional do ar. A fumaça, gerada pelo equipamento Tecport F-950, foi injetada a montante do bocal convergente. O smartphone Samsung Galaxy S20 FE, posicionado ortogonalmente à seção de testes, gravou o ensaio na função *Super Slow Motion* a 960 fps. Essa taxa de quadros propiciou uma resolução temporal suficiente para observar o desprendimento dinâmico dos vórtices na base traseira do veículo, subsidiando a análise fenomenológica que será apresentada no capítulo de Resultados.

A Figura 4.11 ilustra a bancada durante a execução do ensaio qualitativo, destacando a incidência do plano laser sobre a nuvem de traçadores.

Figura 4.10. Visualização do escoamento em torno do modelo iluminado por plano laser verde



Fonte: Próprio Autor.

5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos através dos ensaios em túnel de vento. A análise foi dividida em duas etapas fundamentais: primeiramente, uma avaliação qualitativa do comportamento fluido-dinâmico ao redor do modelo, utilizando técnicas de visualização de escoamento. Em seguida, procedeu-se a análise quantitativa dos esforços aerodinâmicos medidos pela balança, culminando no cálculo dos coeficientes aerodinâmicos e na estimativa de consumo de combustível.

5.1 Visualização do Escoamento

Para compreender a origem física dos esforços aerodinâmicos que atuam sobre o ônibus, realizou-se a injeção de fumaça conjugada à iluminação por feixe de laser transversal. Esta técnica permitiu a observação direta das zonas de alta pressão, do comportamento da camada limite e das regiões de separação de esteira. A análise foi subdividida em quatro perfis de visualização para englobar toda a topologia do escoamento.

5.1.1 Escoamento na Região Frontal e Ponto de Estagnação

A análise qualitativa da região frontal do modelo evidencia o comportamento clássico do escoamento incidindo sobre um corpo rombudo. Imediatamente na parte central da carenagem dianteira (para-choque frontal), observa-se a interrupção abrupta das linhas de corrente, caracterizando o ponto de estagnação. Neste local geométrico, a velocidade do fluido decai a zero, resultando na conversão total da energia cinética do escoamento em pressão. Esta parede

de alta pressão frontal é a principal responsável pela parcela de arrasto de forma (*form drag*) do veículo.

Ao atingir o ponto de estagnação, o fluido é forçado a contornar os para-brisas inferior e superior. Nota-se visualmente um estreitamento das linhas de fumaça, o que indica uma forte aceleração do escoamento nesta região. O formato da curvatura frontal do modelo demonstrou-se eficiente em evitar o descolamento prematuro da esteira de ar: observa-se que a camada limite permanece aderida à superfície do para-brisa. Isso é possível analisar na imagem apresentada na Figura 5.1.

Figura 5.1. Escoamento de fumaça sobre o modelo com feixe de laser na frente do veículo.



Fonte: Próprio Autor

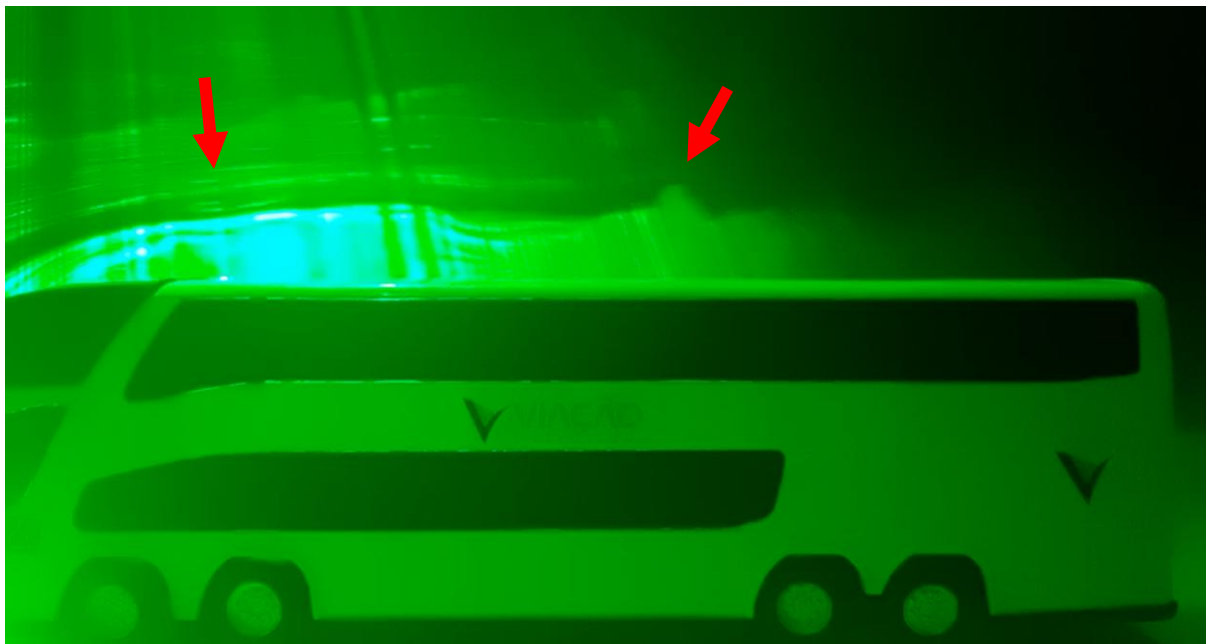
Na transição da aresta superior do para-brisa para o teto, o escoamento contorna a geometria de forma limpa, sem a geração de vórtices transversais. Esta aceleração contínua do fluido sobre a curvatura do teto gera, em contrapartida, uma zona de pressão negativa (sucção) em relação à pressão atmosférica circundante. Este fenômeno explica a geração de forças verticais ascendentes sobre o teto da carroceria, justificando os valores de Coeficiente de Sustentação (C_S) positivos que serão abordados na análise quantitativa. Estes fenômenos podem ser analisados no vídeo disponível ([clikando aqui](#)).

5.1.2 Escoamento Longitudinal sobre o Teto e Desenvolvimento da Camada Limite

Dando sequência à análise da topologia do escoamento, a visualização da seção central e superior do veículo revela o comportamento do fluido ao longo do teto da carroceria. O aspecto

mais relevante observado nestas imagens é a manutenção da movimentação das partículas de fumaça, que permanecem paralelas e próximas à superfície do modelo por quase toda a sua extensão longitudinal, vista na Figura 5.2. Este fenômeno caracteriza um escoamento colado sobre a superfície, indicando que a energia cinética do fluido nesta região é suficiente para sobrepujar as forças viscosas sem que ocorra o descolamento da camada limite.

Figura 5.2. Escoamento de fumaça sobre o modelo com feixe de laser na seção central do veículo.



Fonte: Próprio Autor

Sob o ponto de vista do arrasto aerodinâmico, a manutenção do escoamento aderido ao longo do teto é extremamente benéfica. Significa que, nesta seção, o veículo sofre predominantemente a ação do arrasto de atrito (devido à viscosidade do ar contra a superfície plana), evitando a formação de recirculações sobre o teto que aumentariam o arrasto de pressão.

No entanto, à medida que o fluido percorre a longa extensão do teto em direção à traseira do ônibus, a visualização a laser uma desestabilização nas linhas de fumaça. Este comportamento ilustra o espessamento natural da camada limite, indicando que o escoamento atingiu o regime de transição a turbulência. O atrito contínuo com a superfície da carroceria drena progressivamente a energia cinética das camadas de ar mais próximas à parede.

Ao se aproximar da extremidade traseira, nota-se visualmente a perda do padrão lamelar das linhas de corrente e o início de flutuações, caracterizando a transição para um regime turbulento e um descolamento incipiente. O escoamento, já com energia cinética reduzida pela longa trajetória de atrito, encontra a descontinuidade geométrica abrupta da traseira do ônibus,

conhecida como ponto de descolamento, onde enfrenta um forte gradiente adverso de pressão que causa a separação da esteira. Esses fenômenos podem ser melhor observado [clikando aqui](#).

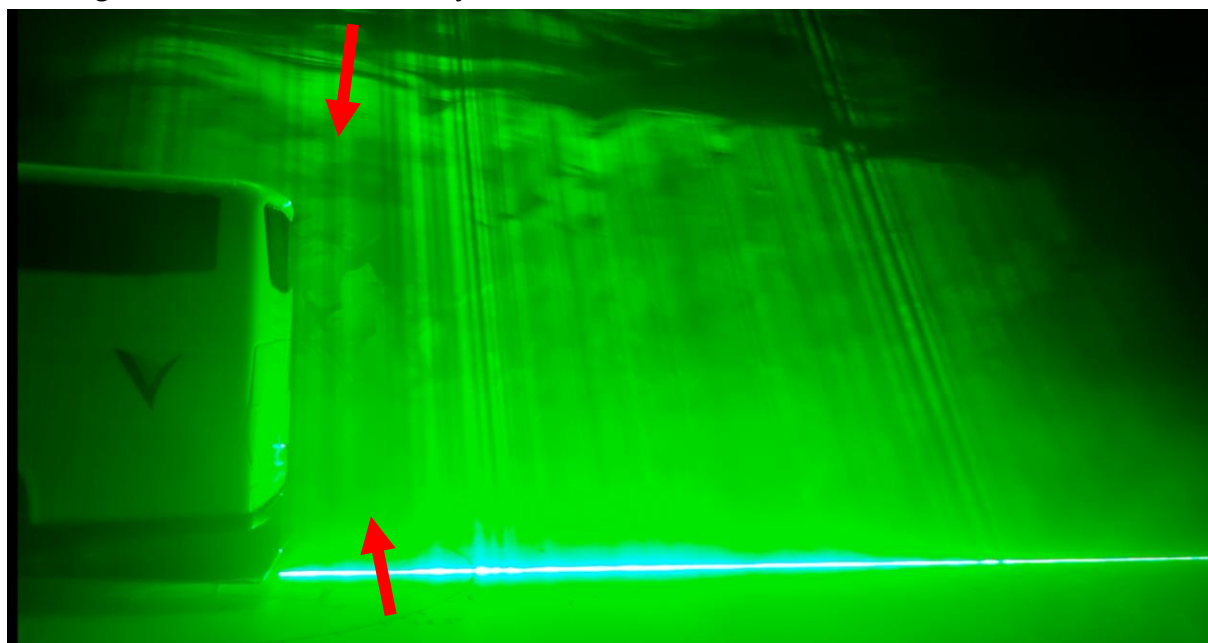
5.1.3 Separação do Escoamento e Formação da Esteira Turbulenta na Traseira

Ao analisar a extremidade traseira do veículo, a técnica de visualização a laser ilustra o fenômeno aerodinâmico mais crítico em corpos rombudos (bluff bodies): a separação total do escoamento e a formação da esteira de vórtices.

Diferentemente de perfis aerodinâmicos em formato de gota (onde o escoamento afunila suavemente), a geometria convencional de um ônibus apresenta um corte abrupto na região posterior. O escoamento, ocorria aderido ao teto e às superfícies laterais, não possui momento suficiente para contornar o gradiente adverso de pressão gerado pela quina de 90 graus, resultando no descolamento imediato da camada limite (Figura 5.3).

Atrás do painel traseiro do ônibus, tomos a formação de uma extensa região de recirculação, tecnicamente denominada esteira de Von Kármán. Nota-se que a fumaça perde instantaneamente a suavidade no movimento das linhas de corrente (observadas no teto) e assume um comportamento macroscópico caótico, caracterizado pela formação clara e contínua de vórtices. Estas estruturas turbilhonares representam uma dissipação massiva de energia cinética do fluido para o ambiente que podem ser vistas na Figura 5.3.

Figura 5.3. Escoamento de fumaça sobre o modelo com feixe de laser na traseira do veículo.



Fonte: Próprio Autor

Do ponto de vista da termodinâmica e da mecânica dos fluidos, a formação desta esteira turbulenta resulta em uma zona de baixa pressão estática (sucção) na traseira do veículo. Ao

cruzar este dado visual com a observação da região frontal (onde ocorre a estagnação e o pico de alta pressão), evidencia-se fisicamente a origem do arrasto de pressão. É este diferencial de pressões o principal responsável pela magnitude do Coeficiente de Arrasto medido na balança aerodinâmica, consolidando-se como a maior barreira para a redução do consumo de combustível na velocidade de cruzeiro. É possível observar no vídeo [clikando aqui](#).

5.2 Aquisição e Tratamento dos Dados Experimentais

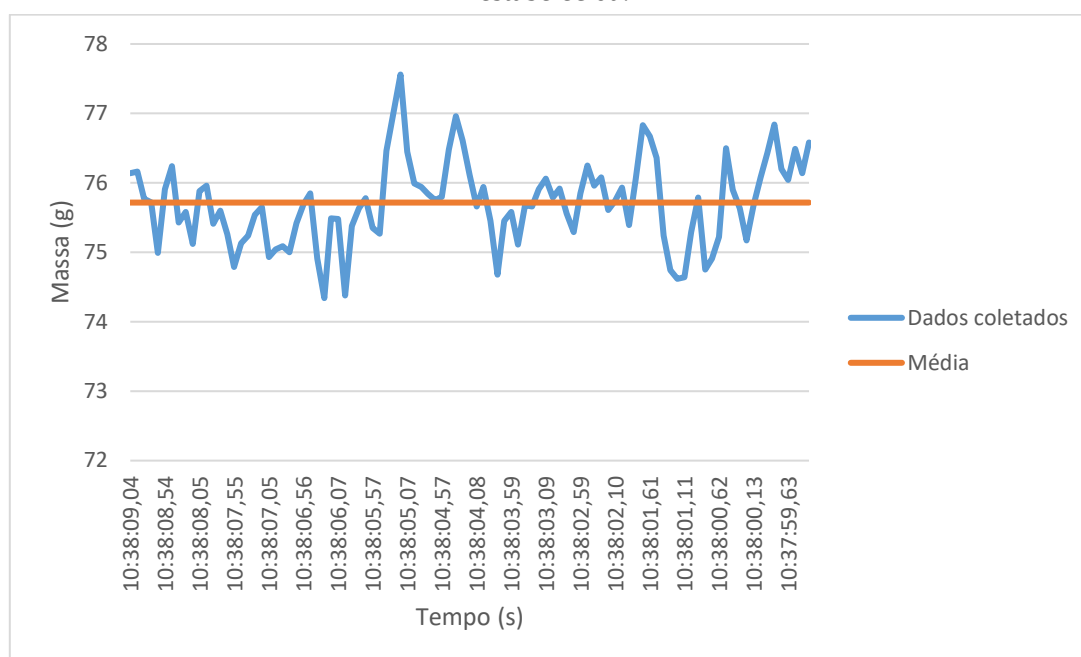
A análise quantitativa exigiu a estruturação e o tratamento estatístico das leituras de força e pressão coletadas pela instrumentação do túnel de vento. Conforme definido na metodologia, os dados originais foram registrados em patamares discretos de rotação do ventilador (de 300 RPM a 1500 RPM, com incrementos de 100 RPM).

O objetivo primordial deste tratamento foi atenuar a influência de flutuações transientes e vibrações mecânicas inerentes à formação da esteira turbulenta do modelo, para tanto, utilizou-se médias amostrais.

5.2.1 Consolidação das Rodadas de Arrasto e Sustentação

Durante a execução dos ensaios no túnel de vento, as forças aerodinâmicas incidentes sobre o modelo apresentam flutuações ao longo do tempo devido à natureza do escoamento. A balança aerodinâmica registra essas variações instantâneas de forma contínua. Para obter um valor representativo em cada patamar de velocidade, calcula-se a média temporal dos dados de força adquiridos durante o período de amostragem. A Figura 5.4 ilustra o comportamento oscilatório da força medida em função do tempo para uma velocidade de ensaio, destacando a linha de tendência que indica a média temporal. Este valor médio calculado é o parâmetro extraído para cada rotação imposta ao equipamento.

Figura 5.4. Variação da massa em função do tempo e respectiva média temporal para uma velocidade estabelecida.



Fonte: Próprio Autor

Para garantir a confiabilidade aleatória dos esforços aerodinâmicos incidentes no modelo do ônibus, a aquisição de dados foi repetida 5 (cinco) vezes independentes para cada eixo de análise. As Tabelas 5.1 e 5.2 apresentam, respectivamente, o agrupamento das massas (dados brutos) registradas pela balança nos ensaios de arrasto e de sustentação.

Tabela 5.1. Matriz de consolidação dos cinco testes experimentais para o Arrasto.

Rotação (RPM)	Teste 1 (g)	Teste 2 (g)	Teste 3 (g)	Teste 4 (g)	Teste 5 (g)	Média (g)
300	6,62720	9,25690	4,59450	6,21220	7,83220	6,90460
400	11,7061	25,6421	10,5521	11,3984	10,9995	14,0596
500	20,2634	18,0756	17,0888	17,7132	17,0632	18,0408
600	24,729	38,2794	26,9994	36,2312	25,9334	30,4345
700	50,4723	37,1699	36,7822	37,7812	40,7912	40,5994
800	48,515	46,2901	61,897	46,2901	46,8004	49,9585
900	59,4012	74,6131	64,3814	58,6178	56,8771	62,7781
1000	75,7161	89,6338	75,8116	78,4408	78,683	79,6571
1100	85,2577	90,6127	105,551	103,394	83,8155	93,7262
1200	121,419	110,705	115,769	116,987	108,929	114,762
1300	128,591	132,485	147,742	141,053	129,733	135,921
1400	154,952	161,329	173,950	169,716	164,210	164,831
1500	196,619	199,505	192,085	214,193	207,079	201,896

Fonte: Próprio Autor

Tabela 5.2. Matriz de consolidação dos cinco teste experimentais para a Sustentação.

Rotação (RPM)	Teste 1 (g)	Teste 2 (g)	Teste 3 (g)	Teste 4 (g)	Teste 5 (g)	Média (g)
300	2,89227	1,92820	1,85810	2,18800	5,30940	2,83519
400	5,38445	6,73070	3,77110	3,64710	3,58770	4,62421
500	6,07014	5,18500	5,44960	5,17600	5,96720	5,56959
600	6,85312	12,0926	8,13090	10,4185	7,95900	9,09082
700	13,7481	10,2753	9,87420	10,6752	10,7186	11,0583
800	14,8306	13,7740	12,9940	14,4339	13,8838	13,9833
900	17,2907	22,0162	15,8459	17,8583	18,1261	18,2274
1000	27,1809	25,5375	21,1063	21,0931	22,2090	23,4254
1100	23,8357	26,1762	25,8276	24,6578	27,1037	25,5202
1200	32,2984	30,6982	28,6897	31,5140	33,1704	31,2741
1300	31,8314	36,6908	36,7645	38,2675	39,0697	36,5248
1400	39,5529	45,1918	44,1357	44,9573	44,1828	43,6041
1500	51,4675	54,5497	48,5974	52,2956	70,6267	55,5074

Fonte: Próprio Autor

O procedimento de tratamento consistiu na aplicação da média aritmética simples sobre o conjunto das cinco amostras de cada rotação. Essa abordagem permitiu atenuar ruídos de alta frequência do sistema de aquisição, extraindo apenas o componente estacionário da força. Os valores estabilizados resultantes, expressos inicialmente na unidade de calibração do hardware (gramas), forneceram a base de dados necessária para a posterior conversão em esforços reais (Newtons).

5.2.2 Mapeamento do Diferencial de Pressão e Matriz Principal

Paralelamente à aquisição das forças físicas, a caracterização da cinemática do escoamento dependeu do monitoramento da pressão dinâmica no interior da seção de testes. Para cada rotação imposta no motor, o diferencial de pressão gerado pelo bocal convergente foi lido, estabilizado em médias e alinhado aos dados de carga da balança.

O cruzamento das pressões médias com as forças previamente tratadas deu origem à Matriz Principal de Dados Experimentais (Tabela 5.3).

Tabela 5.3. Matriz Principal agrupando variáveis de pressão e massa específica do ar.

Rotação (RPM)	Diferença de Pressão (Pa)	Massa Específica do Ar (kg/m³)
300	15,9262	1,1057
400	33,9467	1,1051
500	49,1225	1,1076
600	73,8483	1,1023
700	102,7898	1,1023
800	136,6537	1,1150
900	173,2256	1,1060
1000	217,7964	1,1024
1100	269,0275	1,1034
1200	317,4527	1,1026
1300	374,6260	1,1077
1400	434,6639	1,1060
1500	500,3743	1,1110

Fonte: Próprio Autor

A compilação da Matriz Principal elimina a dispersão dos arquivos brutos e unifica os dados de todos os ensaios em uma única base referencial. É a partir das informações centralizadas nesta matriz que se torna possível o processamento numérico que será discutido no próximo subcapítulo: a determinação exata da velocidade de escoamento, do Número de Reynolds característico e, por fim, a extração dos coeficientes aerodinâmicos adimensionais do veículo.

5.3 Processamento dos Parâmetros Aerodinâmicos e Determinação dos Coeficientes

Após a consolidação e o tratamento estatístico das médias temporais das rodadas experimentais, deu-se início à fase de processamento numérico dos dados. Esta etapa consiste na transformação das grandezas primárias medidas no túnel de vento (diferencial de pressão em Pascal e forças em gramas) em parâmetros adimensionais universalmente comparáveis na mecânica dos fluidos.

A velocidade local do escoamento para cada patamar de rotação do ventilador foi extraída diretamente pelo sistema de aquisição das tomadas de pressão no bocal do convergente do túnel.

Com isso, a Tabela 5.4 apresenta os resultados desse primeiro bloco de processamento cinemático do escoamento ao longo de toda a faixa de rotações ensaiada.

Tabela 5.4. Parâmetros cinemáticos do escoamento (Pressão, Velocidade e Reynolds) em função da rotação do túnel.

Rotação (RPM)	Diferença de Pressão (Pa)	Massa Específica do Ar (kg/m ³)	Velocidade (m/s)	Re
300	15,9262	1,1057	5,4809	100443
400	33,9467	1,1051	8,0039	146607
500	49,1225	1,1076	9,6173	176558
600	73,8483	1,1023	11,8205	215953
700	102,7898	1,1023	13,9452	254789
800	136,6537	1,1150	15,9875	295460
900	173,2256	1,1060	18,0732	331309
1000	217,7964	1,1024	20,2982	370894
1100	269,0275	1,1034	22,5496	412396
1200	317,4527	1,1026	24,5040	447815
1300	374,6260	1,1077	26,5584	487588
1400	434,6639	1,1060	28,6290	524812
1500	500,3743	1,1110	30,6477	564358

Fonte: Próprio Autor

De posse das forças atuantes e devidamente corrigidas em Newtons, procedeu-se ao cálculo final de (C_A) e (C_S). Estes coeficientes relacionam a força gerada no modelo com a energia cinética disponível no escoamento e a área frontal de referência do veículo ($A = 0,00463 \text{ m}^2$), conforme já mostradas nas Equações 2.1 e 2.2. Os valores finais computados linha a linha estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Forças e coeficientes aerodinâmicos adimensionais.

Rotação (RPM)	Velocidade do Escoamento (m/s)	F_A (N)	C_A	F_S (N)	C_S
300	5,4808	0,0677	0,8797	0,0278	0,3612
400	8,0038	0,1379	0,8404	0,0454	0,2764
500	9,6172	0,1770	0,7452	0,0546	0,2301
600	11,8205	0,2986	0,8362	0,0892	0,2498
700	13,9452	0,3983	0,8014	0,1085	0,2183
800	15,9874	0,4901	0,7418	0,1372	0,2076
900	18,0732	0,6159	0,7353	0,1788	0,2135
1000	20,2981	0,7814	0,7421	0,2298	0,2182
1100	22,5496	0,9195	0,7069	0,2504	0,1925
1200	24,5040	1,1258	0,7335	0,3068	0,1999
1300	26,5583	1,3334	0,7362	0,3583	0,1978
1400	28,6290	1,6170	0,7695	0,4278	0,2035
1500	30,6476	1,9806	0,8187	0,5445	0,2251

Fonte: Próprio Autor

Cabe salientar que a presença do aparato de fixação do modelo à balança aerodinâmica introduz uma interferência física inerente à realização do ensaio. Contudo, a magnitude do arrasto parasita gerado por estas estruturas de suporte é diminuta frente aos esforços totais produzidos pela geometria do ônibus. Por este motivo, a interferência do equipamento foi considerada desprezível para o escopo deste estudo. Optou-se por não realizar a subtração analítica desta parcela nas equações, assumindo-se que os coeficientes calculados a partir dos dados brutos representam o comportamento aerodinâmico do veículo de forma fidedigna.

5.3.1 Independência no Número de Reynolds e Validação

A avaliação do coeficiente de arrasto líquido ao longo das treze rotações ensaiadas (Tabela 5.5) revela o comportamento clássico de transição e estabilização de um escoamento sobre corpos rombudos (*bluff bodies*). A análise da matriz de resultados demonstra que o C_A não é estático em baixas velocidades, apresentando uma média global de 0,7759, porém com uma variância significativa a depender do regime de escoamento.

Na faixa de rotações mais baixas (300 a 700 RPM), os valores de C_A exibem maior magnitude e oscilação, partindo de 0,8797 e oscilando até 0,7452. Este comportamento é fisicamente esperado em ensaios de túnel de vento em escala: em baixos Números de Reynolds, as forças viscosas ainda exercem grande influência sobre a camada limite, atrasando a separação do escoamento e gerando instabilidades na formação da esteira turbulenta, o que aumenta artificialmente a leitura da balança. Além disso, o túnel de vento utilizado tem intensidade turbulenta maior em baixas velocidades, sempre apresentando um desvio-padrão maior em rotações abaixo de 500 rpm (Cardoso, 2020).

Entretanto, à medida que a energia cinética do escoamento aumenta, as forças inerciais passam a dominar o campo fluido-dinâmico. A partir da marca de 800 RPM, na Tabela observa-se a clara estabilização do coeficiente de arrasto. O alcance deste platô indica que o ensaio atingiu o critério de Independência do Número de Reynolds. Nesta faixa operacional mais alta (800 RPM a 1500 RPM), os efeitos viscosos tornam-se desprezíveis em relação ao arrasto de pressão, e o modelo em escala passa a representar com fidelidade o comportamento aerodinâmico do veículo em tamanho real. Nesta região estabilizada, o C_A assenta-se em uma média de 0,7480.

A validação deste resultado consolida-se ao compará-lo com os dados vigentes na literatura de mecânica dos fluidos automotiva. Veículos pesados de transporte de passageiros e cargas operam intrinsecamente com elevados gradientes adversos de pressão. De acordo com a literatura clássica do setor ônibus urbanos com frentes planas costumam apresentar C_A entre

0,80 e 0,90. Já ônibus rodoviários modernos, dotados de para-brisas inclinados e arestas levemente arredondadas, operam na faixa de 0,60 a 0,75. Caminhões sem defletores de ar superiores também ocupam o espectro de 0,80 a 1,0 (Fox, 2014)..

A validação deste resultado consolida-se ao compará-lo com os dados vigentes na literatura de mecânica dos fluidos automotiva. De acordo com Hucho (1998), o coeficiente de arrasto de ônibus, caracterizados por frentes rombas e geometria de caixa, situa-se tipicamente na faixa de 0,50 a 0,80.

Diante desta parametrização, o coeficiente estabilizado de 0,7480 obtido experimentalmente demonstra notável coerência. Ele comprova que as geometrias frontais arredondadas da miniatura foram capazes de manter o escoamento aderido, como visualizado nos ensaios de fumaça. Ao mesmo tempo, a traseira truncada abrupta manteve a geração da esteira de recirculação responsável pelo arrasto de forma, ancorando o valor na realidade dos veículos pesados comerciais. Este coeficiente de arrasto médio confere plena validade ao aparato experimental e servirá como base rigorosa para a estimativa térmica de consumo de combustível do motor.

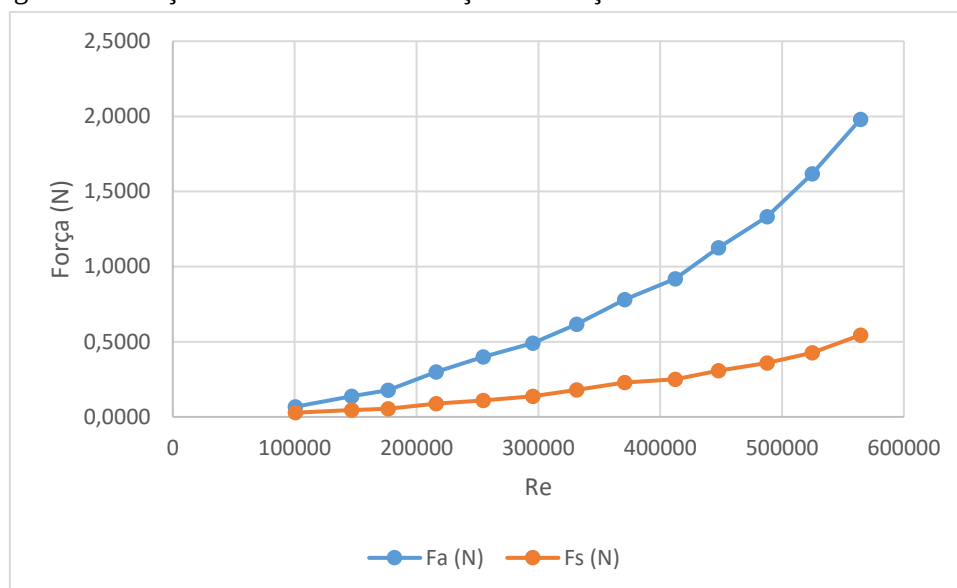
5.4 Análise Gráfica dos Esforços e Coeficientes Aerodinâmicos

A visualização gráfica dos dados experimentais tratados permite a verificação direta dos princípios fundamentais da mecânica dos fluidos aplicados ao modelo em escala. A análise foi dividida entre o comportamento absoluto das forças físicas mensuradas e a estabilização dos parâmetros adimensionais.

5.4.1 Comportamento Parabólico das Forças Aerodinâmicas

A evolução das forças de arrasto líquido (F_A) e de sustentação (F_S) em função da velocidade do escoamento incidente é apresentada na Figura 5.4.

Figura 5.5. Forças de Arrasto e Sustentação em função da velocidade do escoamento.



Fonte: Próprio Autor

Conforme preconizado pela formulação clássica, observa-se que ambas as forças apresentam um crescimento parabólico e proporcional ao quadrado da velocidade (V^2).

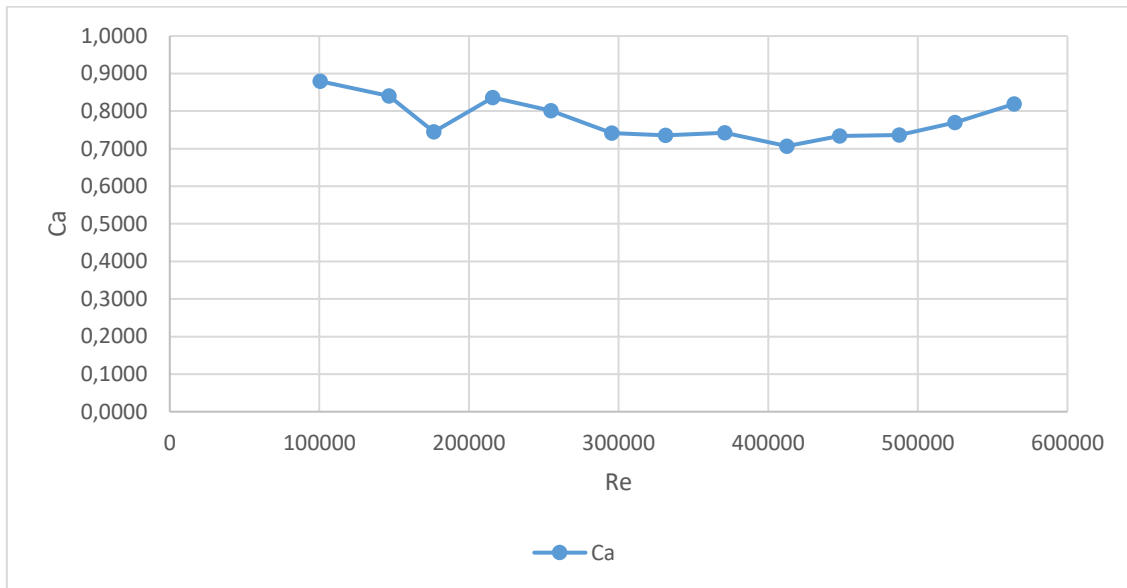
Destaca-se, entretanto, a diferença de magnitude e taxa de crescimento entre as duas curvas. A curva de F_A ascende de forma acentuada, comprovando que, para geometrias rombudas representativas de veículos pesados comerciais, o esforço de resistência ao avanço é dominante. Por outro lado, a curva de sustentação apresenta um crescimento sutil, reflexo do escoamento suave e aderido sobre o teto do veículo previamente visualizado nos ensaios de fumaça, o qual gera uma força de sucção vertical de baixa intensidade quando comparada à barreira de pressão frontal.

5.4.2 Independência de Reynolds e Estabilização dos Coeficientes Aerodinâmicos

Para extrapolar os resultados do modelo em escala 1:43 para o protótipo real operando em rodovias, é imprescindível demonstrar a independência dos parâmetros aerodinâmicos frente às forças viscosas do fluido. Essa validação fluido-dinâmica é realizada avaliando-se o comportamento dos coeficientes em função do Número de Reynolds característico do escoamento, Figura 5.7.

A Figura 5.5 ilustra o comportamento isolado do coeficiente de arrasto (C_A) em função do número de Reynolds.

Figura 5.6. Estabilização do coeficiente de arrasto (C_A) em função do Número de Reynolds

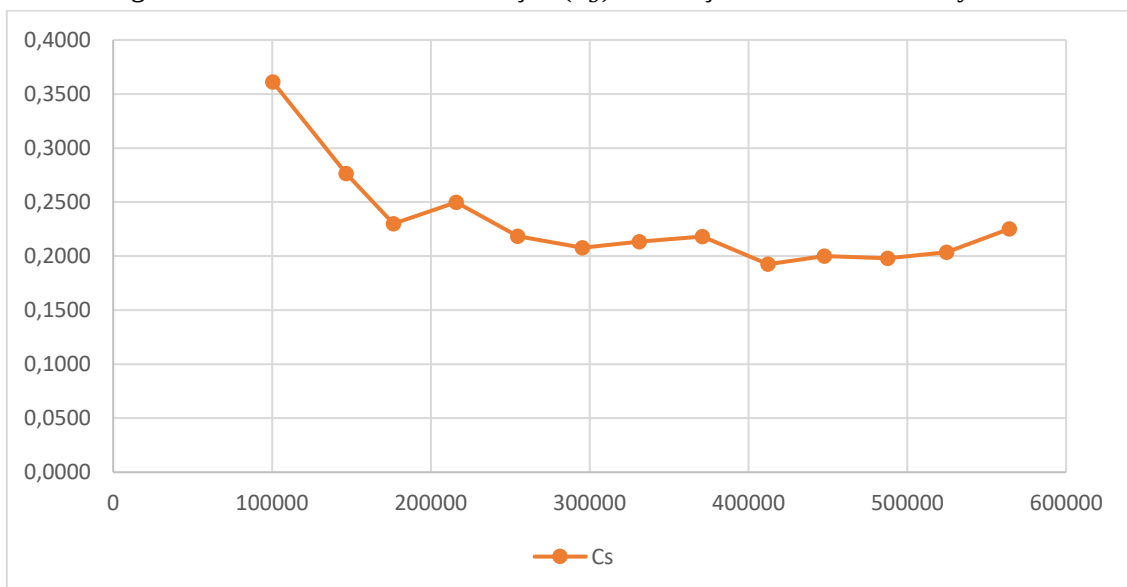


Fonte: Próprio Autor

Na Figura 5.7 observa na curva de coeficiente de arrasto que, para os números de Reynolds abaixo de $2,5 \cdot 10^5$, o coeficiente de arrasto apresenta maior magnitude e oscilação. Esse fenômeno reflete a forte influência dos efeitos viscosos no descolamento da camada e a imprecisão das medidas feitas no túnel de vento. Contudo, conforme a inércia do escoamento aumenta, a curva transita para um regime de independência de Re, onde a força de arrasto devido a pressão passa a dominar integralmente o escoamento, estabilizando-se macroscopicamente.

De maneira análoga, a Figura 5.6 apresenta a evolução da curva para o coeficiente de sustentação (C_S).

Figura 5.7. Coeficiente de sustentação (C_S) em função do Número de Reynolds

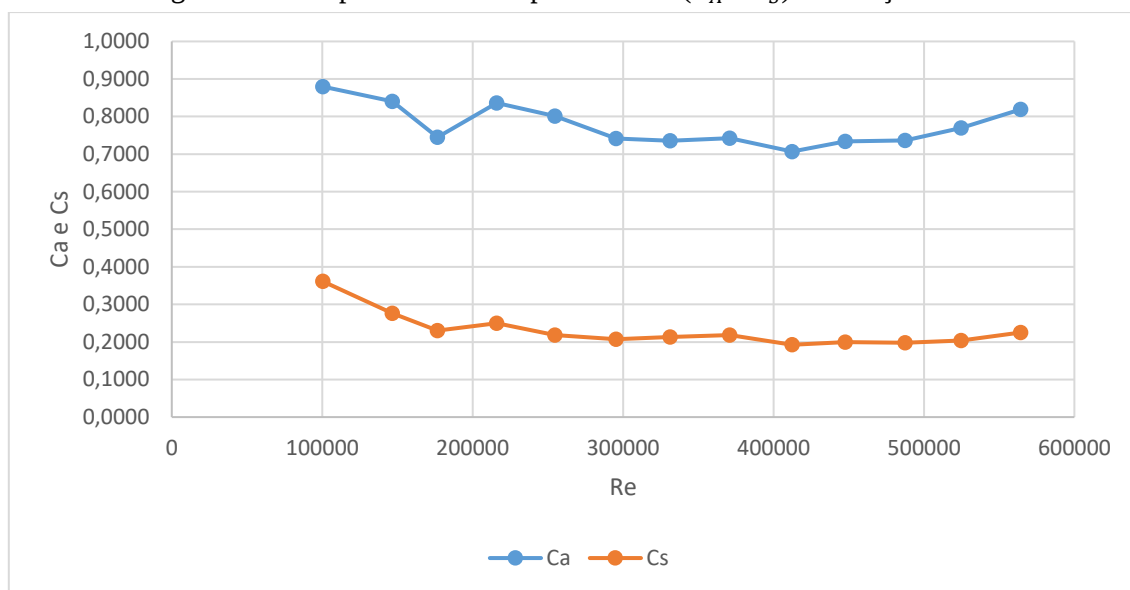


Fonte: Próprio Autor

A análise isolada, ainda com relação a Fig. 5.7, do coeficiente de sustentação revela uma estabilização para uma faixa de número de Reynolds menor e bem definida. A partir de escoamentos com velocidade incidente de 15,9 m/s (equivalentes a 800 RPM no equipamento), o coeficiente estabiliza, fixando-se em um patamar médio praticamente linear e de baixa magnitude, reflexo do escoamento contínuo sobre o teto do modelo.

Por fim, a Figura 5.7 sobrepõe as curvas de ambos os coeficientes em um único plano analítico.

Figura 5.8. Comportamento comparativo dos (C_A e C_S) em função de Re.



Fonte: Próprio Autor

A visualização conjunta atesta definitivamente que, superada a zona de transição governada pela viscosidade, as componentes adimensionais das forças perdem a dependência da velocidade relativa. Esta estabilização global atesta a integridade física do experimento e habilita o patamar do coeficiente obtido para a previsão do consumo energético e emissões do veículo em escala real.

5.5 Estimativa de Consumo de Combustível e Impacto Ambiental

A obtenção de um coeficiente de arrasto estabilizado e isolado das interferências do túnel de vento permite extrapolar os dados experimentais para o cenário operacional de uma frota rodoviária. O objetivo desta etapa é quantificar o impacto aerodinâmico no consumo de combustível e nas emissões de gases de efeito estufa para um veículo em escala real operando em velocidade de cruzeiro.

5.5.1 Parâmetros e Condições de Contorno

Para o dimensionamento das forças de resistência e exigência de potência do motor, estabeleceu-se o cenário de um ônibus rodoviário padrão, operando em rodovia plana, sem interferência de ventos laterais e em regime permanente. Os parâmetros adotados para o modelo matemático foram fundamentados em literaturas consolidadas de dinâmica veicular, normas de trânsito e especificações de fluidos, conforme listado abaixo:

- **Velocidade de Cruzeiro (V):** 90 km/h ou 25 m/s. Este valor corresponde ao limite de velocidade estabelecido pelo Código de Trânsito Brasileiro (CTB) para veículos pesados de transporte de passageiros em rodovias (BRASIL, 1997).
- **Massa Total do Veículo (m):** 19.170 kg. Corresponde ao peso do ônibus Marcopolo Paradiso New G7 1800 DD (MARCOPOLO).
- **Área Frontal (A):** 9,0 m². Valor de referência clássico para ônibus rodoviários de piso alto, correspondendo ao produto da largura e altura úteis da carenagem (HUCHO, 1998).
- **Densidade do Ar (ρ):** 1,2 kg/m³. (Atmosfera Padrão ao nível do mar).
- **Coeficiente de Resistência ao Rolamento (C_{rr}):** 0,006. Parâmetro tabelado para pneus calibrados de veículos pesados operando sobre asfalto em boas condições (GILLESPIE, 1992).
- **Eficiência da Transmissão (η):** 0,85. Considera-se uma perda mecânica de 15% ao longo da caixa de câmbio, eixo cardã e diferencial até as rodas (BOSCH, 2014).
- **Consumo Específico de Combustível (BSFC):** 0,210 kg/kWh. Índice de eficiência térmica característico de motores a diesel pesados modernos com injeção direta (HEYWOOD, 1988).
- **Carga do Ar-Condicionado (P_{AC}):** 12 kW. Potência mecânica parasita média exigida pelo compressor do sistema de climatização de teto para manter o conforto térmico no salão de passageiros.
- **Massa específica do Diesel (ρ_{diesel}):** 0,83 kg/L. Especificação média para o óleo diesel S10 comercializado no Brasil regulamentada pela ANP.
- **Fator de Emissão de CO_2 :** 2,68 kgCO₂/L. Padrão internacional para conversão de queima estequiométrica de óleo diesel (IPCC, 2006).

5.5.2 Cálculo das Forças de Resistência

A resistência total ao avanço (F_{tot}) é dada pela soma da Força Aerodinâmica (F_{aero}) e da Força de Resistência ao Rolamento (F_{rol}).

Para o cálculo aerodinâmico, adotou-se o coeficiente de arrasto médio da região de independência de Reynolds (média dos pontos entre 800 RPM e 1500 RPM do ensaio experimental). A força aerodinâmica foi calculada pela Equação 5.1:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{A(médio)} \cdot A \cdot V^2 \quad (5.1)$$

Resultando em $F_{aero} = 2524,51$ N.

Com base na Equação 2.4. A força necessária para deformar os pneus contra a via (F_{rol}) baseia-se na massa do veículo e na aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$), dada pela Equação 5.2:

$$F_{rol} = 19.170 \cdot 9,81 \cdot 0,006 = 1128,34 \text{ N} \quad (5.2)$$

Somando-se ambas as parcelas, a Força Total de Resistência imposta ao veículo a 90 km/h é de 3652,86 N.

5.5.3 Exigência de Potência e Consumo de Combustível

Analisando a Equação 2.5, a potência mecânica total requerida pelo motor (P_{req}) deve vencer a força total em uma dada velocidade, superando as perdas de transmissão, além de alimentar a carga auxiliar do ar-condicionado (Equação 5.3).

$$P_{req} = \left[\frac{3652,86 \cdot 25}{0,85 \cdot 1000} \right] + 12 = 119,43 \text{ kW} \quad (5.3)$$

Aplicando o Consumo Específico (BSFC) da Equação 2.6, determina-se o consumo mássico de diesel por hora de viagem (Equação 5.4):

$$\text{Consumo Mássico} = 119,43 \cdot 0,210 = 25,08 \text{ kg/h} \quad (5.4)$$

Através da massa específica do diesel comercial, converte-se o consumo mássico para volumétrico (Equação 5.5):

$$\text{Consumo Volumétrico} = \frac{25,08}{0,83} = 30,21 \text{ L/h} \quad (5.5)$$

Considerando que em 1 hora o veículo percorre 90 km, a autonomia específica obtida com o coeficiente aerodinâmico extraído do túnel de vento é calculada pela Equação 5.6:

$$\text{Autonomia} = \frac{90}{30,21} = 2,9782 \text{ km/L} \quad (5.6)$$

5.5.4 Emissões de CO₂ Específicas

Por fim, o impacto ambiental direto atrelado ao arraste e atrito dos pneus do veículo é quantificado relacionando-se o fator de conversão de carbono do diesel com a autonomia calculada (Equação 5.7):

$$\text{Emissão} = \frac{2,68}{2,9782} = 0,8998 \text{ kgCO}_2/\text{km} \quad (5.7)$$

5.5.5 Análise dos Resultados Finais

Os dados obtidos — uma autonomia de 2,9782 km/L e uma emissão de 0,8998 kgCO₂ por quilômetro rodado — atestam rigorosamente a validade do ensaio experimental. Este consumo de combustível insere-se com notável precisão na janela operacional real de frotas de transporte rodoviário no Brasil (que tipicamente registram médias entre 2,8 km/L e 3,3 km/L para veículos de configuração equivalente).

Os dados obtidos em cálculo — uma autonomia de 2,9782 km/L e uma emissão de 0,8998 kgCO₂ por quilômetro rodado — atestam rigorosamente a validade do ensaio experimental. Para fins de validação comparativa, dados operacionais extraídos dos indicadores de gestão da empresa Viação Aragarina Ltda. (Grupo Odilon Santos) demonstram que veículos de configuração equivalente, Mercedes-Benz, apresentam uma performance média real de 2,81 km/L (VIAÇÃO ARAGUARINA LTDA., 2026). A pequena discrepância entre o valor teórico calculado e a média da frota é justificada pelo perfil de operação: enquanto a modelagem matemática assume um regime de cruzeiro ideal, contínuo e em linha reta, a operação real engloba paradas em terminais, tráfego urbano, variações topográficas e acelerações, variáveis que naturalmente penalizam o rendimento energético.

Fica demonstrado matematicamente que a força aerodinâmica atua como a componente majoritária da resistência térmica do veículo, correspondendo a mais do dobro da resistência de rolagem na velocidade estipulada. Dessa forma, qualquer investimento na otimização

aerodinâmica do *design* frontal e traseiro reflete diretamente e em grande escala na mitigação dos custos operacionais das viagens e na redução da pegada de carbono do setor de transportes.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho alcançou com êxito o objetivo de analisar o comportamento aerodinâmico de um veículo coletivo de transporte através de ensaios experimentais em túnel de vento em escala reduzida, correlacionando os coeficientes adimensionais obtidos com o desempenho energético e o impacto ambiental de um protótipo em escala real.

A abordagem metodológica qualitativa, realizada por meio da visualização do escoamento com injeção de fumaça e iluminação a laser, permitiu compreender a topologia dos escoamentos ao redor do ônibus. Identificou-se o ponto de estagnação na região frontal como a principal fonte de pressões estáticas elevadas e a descontinuidade geométrica traseira como o gatilho para o descolamento prematuro da camada limite. A formação de uma esteira turbulenta repleta de estruturas turbilhonares na região posterior evidenciou a dominância do arrasto de forma em corpos rombudos, fornecendo a justificativa física para as magnitudes de força registradas.

No âmbito quantitativo, o tratamento estatístico das cinco teste de medição e a aplicação do princípio da superposição de forças mostraram-se indispensáveis. A análise dos coeficientes em função do Número de Reynolds comprovou a convergência dos dados e o alcance da zona de independência do número de Reynolds a partir de escoamentos superiores a 13,9 m/s. Nesse regime estabilizado, o coeficiente de arrasto líquido do veículo consolidou-se em 0,7480, um patamar perfeitamente coerente com os valores estipulados pela literatura automotiva para carrocerias rodoviárias comerciais.

A extrapolação termodinâmica e dinâmica desses resultados para o veículo real operando a 90 km/h demonstrou o impacto prático da aerodinâmica na eficiência energética. O modelo matemático revelou que o motor necessita desenvolver uma potência total de 119,43 kW para vencer as forças de resistência ao avanço e suprir a carga parasitária fixa de 12 kW do sistema de ar-condicionado. Esse cenário operacional resultou em uma autonomia específica de 2,9782 km/L e em uma taxa de emissão de dióxido de carbono de 0,8998 kgCO₂/km. Tais valores validam a confiabilidade do ensaio experimental por se situarem rigorosamente dentro das médias de consumo observadas em frotas de transporte intermunicipal de passageiros.

Em suma, este estudo reforça que a resistência aerodinâmica constitui a parcela majoritária das perdas energéticas de um ônibus em velocidades de cruzeiro, superando amplamente a resistência ao rolamento dos pneus. Portanto, refinamentos na geometria externa do veículo representam o caminho mais promissor para a redução de custos operacionais e para

a mitigação da pegada de carbono no setor de transportes, alinhando a engenharia automotiva às demandas contemporâneas de sustentabilidade ambiental.

Como trabalhos futuros sugere-se fazer alterações no "design" do ônibus e repetir os experimentos, com o intuito de minimizar as forças de arrasto. Além disso, também sugere-se avançar os estudos em aerodinâmica veicular, aplicando a metodologia desenvolvida no presente trabalho em outros tipos de veículos como caminhões e carros, sejam de passeio ou esportivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AEROALCOOL AERODESIGN. **Túnel de Vento AA-TVSH1**. Santo Antônio de Posse: Aeroalcool Aerodesign, [2026]. Disponível em: <http://aeroalcool.com.br/index.php/tuneis-de-vento/25-gallery/tuneis-de-vento/29-aa-tvsh1>.

Acesso em: 3 jun. 2026.

BARLOW, Jewel B.; RAE, William H.; POPE, Alan. **Low-Speed Wind Tunnel Testing**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.

BOSCH, Robert. **Manual de Tecnologia Automotiva**. 25. ed. São Paulo: Blucher, 2005.

BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 set. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503compilado.htm. Acesso em: 21 jun. 2026.

CARDOSO, Flávia de Melo Ribeiro. **Caracterização experimental de túneis de vento para a análise de potencial eólico**. 2020. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

CARREGARI, André Luiz. **Estudo do Escoamento de Ar sobre a Carroceria de um Ônibus usando um Programa de CFD e Comparação com Dados Experimentais**. 2006. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2015.

FOX, Robert W.; MCDONALD, Alan T.; PRITCHARD, Philip J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

GILLESPIE, Thomas D. **Fundamentals of Vehicle Dynamics**. Warrendale: SAE International, 1992.

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. Nova York: McGraw-Hill Education, 1988.

HUCHO, Wolf-Heinrich. **Aerodynamics of Road Vehicles: From Fluid Mechanics to Vehicle Engineering**. 4. ed. Warrendale: SAE International, 1998.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama, Japão: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.

MARCOPOLO. **Paradiso New G7 1800 DD**. Caxias do Sul: Marcopolo S.A., [2026]. Disponível em: <https://onibus.marcopolo.com.br/produtos/rodoviaros-new-g7/paradiso-new-g7-1800-dd>. Acesso em: 3 jun. 2026.

MERCADO LIVRE. **Máquina Fumaça F-950 Controle Sem E Com Fio 900w.** [S. l.], [2026]. Disponível em: https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-689553409-maquina-fumaca-f-950-controle-sem-e-com-fio-900w-_JM. Acesso em: 3 jun. 2026.

RAMOS, Márcio de Oliveira. **Estudo das melhores práticas da aerodinâmica veicular, visando a melhoria de consumo de combustível e redução de emissões de poluentes aplicadas a veículos de passeio.** 2012. 70 f. Monografia (Especialização em Engenharia Automotiva) - Escola de Engenharia Mauá, Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, 2012.

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

WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos.** 6. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2007.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Código G do Calço do Suporte da Placa

Acesse o código pelo link:

https://drive.google.com/file/d/1P_czI1Y9IJ6DJIdAD0Nlrmu2AbpRaMvB/view?usp=drive_link