



Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia - FCTE
Engenharia Aeroespacial

Desenvolvimento e validação experimental de dispositivos aerodinâmicos para veículos de competição

Autor: Carlos Eduardo Meireles do Amaral
Orientador: Prof. Dr.: Rafael Castilho Faria Mendes
(FCTE/UnB)

Brasília, DF
2025



Carlos Eduardo Meireles do Amaral

Desenvolvimento e validação experimental de dispositivos aerodinâmicos para veículos de competição

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia - FCTE

Orientador: Prof. Dr.: Rafael Castilho Faria Mendes (FCTE/UnB)

Brasília, DF

2025

Carlos Eduardo Meireles do Amaral

Desenvolvimento e validação experimental de dispositivos aerodinâmicos para veículos de competição/ Carlos Eduardo Meireles do Amaral. – Brasília, DF, 2025-
139 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr.: Rafael Castilho Faria Mendes (FCTE/UnB)

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia - FCTE , 2025.

1. Túnel de vento. 2. CFD. I. Prof. Dr.: Rafael Castilho Faria Mendes (FCTE/UnB). II. Universidade de Brasília. III. Faculdade de Ciências e Tecnologias em Engenharia. IV. Desenvolvimento e validação experimental de dispositivos aerodinâmicos para veículos de competição

Carlos Eduardo Meireles do Amaral

Desenvolvimento e validação experimental de dispositivos aerodinâmicos para veículos de competição

Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Aeroespacial) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Aeroespacial).

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 12 de Dezembro de 2025:

**Prof. Dr.: Rafael Castilho Faria
Mendes (FCTE/UnB)**
Orientador

**Prof. Dr.: Felipe Chagas Storti
(FCTE/UnB)**
Convidado 1

**Prof. Dr.: Artur Elias de Moraes
Bertoldi (FCTE/UnB)**
Convidado 2

Brasília, DF
2025

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado em todos os momentos da minha vida, fortalecendo minha fé e permitindo que eu chegasse até aqui.

Agradeço à minha mãe, Edilaine, pelo amor incondicional, pela paciência e pelo apoio constante em cada etapa da minha formação. Ao meu pai, José Alberto, pelo exemplo de trabalho, caráter e dedicação, que sempre foram inspiração para mim.

Aos meus avós Elzira e Edir, e à minha tia Edineiva, pelo suporte, pelos conselhos sábios e pelas orações que me fortaleceram nos momentos de dúvida e cansaço. Sem o carinho e o acolhimento de vocês, este percurso teria sido muito mais difícil.

Estendo meus agradecimentos a toda a minha família, que acreditou em mim, compreendeu minhas ausências e renúncias e sempre me incentivou a seguir em frente. Em especial, agradeço ao meu tio Jorge, ao Davi, à Geovana e ao Abraão, cujo carinho, apoio e torcida foram fundamentais para que eu superasse cada etapa desta jornada.

Aos meus amigos, em especial aos colegas da universidade e aos integrantes da FGR, pela parceria, pelas conversas, pelos estudos compartilhados e pelo apoio mútuo nos momentos de pressão.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, seja com uma palavra de incentivo, um gesto de ajuda ou simplesmente torcendo por mim, ainda que à distância ou em silêncio. A cada um de vocês, o meu muito obrigado.

*“Tudo posso naquele que me fortalece.
(Bíblia Sagrada, Filipenses 4, 13)*

Resumo

Este trabalho investiga o efeito de um pacote aerodinâmico em um veículo de competição do tipo Fórmula SAE, combinando simulações numéricas em *Computational Fluid Dynamics* (CFD) com ensaios experimentais em túnel de vento. Inicialmente, são revisados conceitos de aerodinâmica veicular e os principais dispositivos aplicados a carros de competição, com foco em maximizar a força descendente e controlar o arrasto em veículos monoposto de pequeno porte. Em seguida, desenvolve-se em ambiente CAD um modelo completo do veículo, nas configurações com e sem pacote aerodinâmico, e realiza-se um conjunto de simulações em CFD para estimar coeficientes de arrasto e sustentação, bem como o impacto no tempo de volta. Na etapa experimental, projeta-se e constrói-se uma bancada de ensaios específica para túnel de vento, baseada em uma balança de forças com cinco células de carga *single-point*, módulos HX711, microcontrolador Arduino e um *logger* em Python, permitindo medir simultaneamente as componentes de sustentação e arrasto, além de calcular momentos de arfagem e rolagem do modelo em escala 1:8. São desenvolvidos procedimentos de calibração, filtragem de sinais e correção do acoplamento entre sustentação e arrasto devido ao momento de flexão nas hastes de suporte. Os resultados mostram que o pacote aerodinâmico aumenta significativamente a força descendente e altera o balanço de cargas entre eixos, com tendência consistente entre CFD e ensaio, e boa concordância para o arrasto, sobretudo na configuração sem aerodinâmica. Conclui-se que a metodologia proposta, integrando CAD, CFD, manufatura aditiva e ensaios em túnel de vento, é eficaz para o desenvolvimento e validação de dispositivos aerodinâmicos em veículos de competição, estabelecendo uma base experimental para futuras otimizações e estudos em escala real.

Palavras-chaves: Aerodinâmica experimental; Fórmula SAE; CFD; Túnel de vento; Balança de forças.

Abstract

This work investigates the effect of an aerodynamic package on a Formula SAE competition vehicle by combining numerical simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD) with wind tunnel experiments. First, fundamental concepts of vehicle aerodynamics and the main devices applied to racing cars are reviewed, with emphasis on maximizing downforce and controlling drag in small single-seater vehicles. A complete CAD model of the car is then developed, in both configurations with and without the aerodynamic package, and a set of CFD simulations is carried out to estimate drag and lift coefficients, as well as the impact on lap time. In the experimental stage, a dedicated wind tunnel test bench is designed and built, based on a force balance with five single-point load cells, HX711 modules, an Arduino microcontroller, and a Python-based logger, enabling simultaneous measurement of lift and drag components and calculation of pitch and roll moments for a 1:8 scale model. Calibration procedures, signal filtering and correction of the coupling between lift and drag due to the bending moment in the support struts are developed. The results show that the aerodynamic package significantly increases downforce and alters the load balance between axles, with trends that are consistent between CFD and experiments, and good agreement for drag, especially in the configuration without aerodynamics. It is concluded that the proposed methodology, integrating CAD, CFD, additive manufacturing and wind tunnel testing, is effective for the development and validation of aerodynamic devices for competition vehicles, providing an experimental basis for future optimizations and full-scale studies.

Keywords: Experimental aerodynamics; Formula SAE; CFD; Wind tunnel; Force balance.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução da aceleração lateral de veículos de competição com e sem força aerodinâmica descendente ao longo das décadas. Adaptado de (KATZ, 2016).	22
Figura 2 – Imagem adaptada de (KATZ, 2016)	25
Figura 3 – Imagem adaptada de (SEWARD, 2014)	30
Figura 4 – Tubo de Venturi (COLUNA, 2022)	31
Figura 5 – Carenagem frontal de um FSAE. (a) (LAD et al., 2020); (b) (OXYZO-GLOU, 2017)	32
Figura 6 – Asas dianteiras de um FSAE. (a) (LOPEZ, 2017); (b) (KOGAPPA, n.d.)	33
Figura 7 – Asas traseiras de um FSAE. (a) (ztikmaenn, 2015); (b) (Georgia Tech Motorsports, n.d.)	34
Figura 8 – Difusor e assoalho de um veículo de competição. (a) (JADHAV, 2020); (b) (Ludemann Engineering, n.d.)	35
Figura 9 – <i>flip-ups</i> em um FSAE. (OXYZOGLU, 2017)	36
Figura 10 – Diagrama de corpo livre de um carro FSAE para estimativa de balanço aerodinâmico (DAHLBERG, 2014).	37
Figura 11 – Influência da posição do CP em relação ao CG no comportamento dinâmico do veículo. Adaptado de (KATZ, 2016).	37
Figura 12 – Representação de um túnel de vento de circuito aberto. Adaptado de (NASA, 2022b).	39
Figura 13 – Representação de um túnel de vento de circuito fechado. Adaptado de (NASA, 2022a).	40
Figura 14 – Representação esquemática de uma balança plataforma de 6 componentes utilizada em ensaios aerodinâmicos. Adaptado de (KATZ, 2016)	42
Figura 15 – Representação de uma balança plataforma utilizada em ensaios aerodinâmicos, com mesas giratórias para ajuste da orientação do modelo e hastes de contato para medição das cargas nos pneus. Adaptado de (KATZ, 2016)	42
Figura 16 – Limitações geométricas para utilização de dispositivos aerodinâmicos. Adaptado de <i>FSAE Rules 2025</i>	44
Figura 17 – Representação em formato de fluxograma do processo de simulação CFD	45
Figura 18 – QR codes das animações da automação das asas dianteira e traseira . .	46
Figura 19 – (a) Veículo otimizado sem pacote aerodinâmico; (b) Veículo otimizado com pacote aerodinâmico. (Autor).	48

Figura 20 – Representação tridimensional do domínio de escoamento adotado, dimensionado em função do comprimento característico do veículo (L_x). (Autor).	49
Figura 21 – Representação dos modelos do veículo com malha superficial utilizada na simulação: (a) configuração sem pacote aerodinâmico; (b) configuração com pacote aerodinâmico completo. (Autor).	52
Figura 22 – Representação dos modelos do veículo com malha volumétrica utilizada na simulação: (a) configuração sem pacote aerodinâmico; (b) configuração com pacote aerodinâmico completo. (Autor).	53
Figura 23 – Variação da velocidade em função do tempo, comparando o desempenho do veículo Fórmula SAE com e sem pacote aerodinâmico. (Autor) .	58
Figura 24 – Distribuição dos campos de velocidade e pressão estática: (a) sem pacote aerodinâmico; (b) com pacote aerodinâmico. (Autor).	60
Figura 25 – Visualização das linhas de corrente pela magnitude da velocidade: (a) sem pacote aerodinâmico; (b) com pacote aerodinâmico. (Autor). . . .	61
Figura 26 – Análise de sensibilidade a malha pela variação dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) em função do número de nós para os modelos com e sem pacote aerodinâmico (Autor).	62
Figura 27 – Túnel de vento do LEA, UnB. (MENDES, 2020).	67
Figura 28 – Sensores utilizados para medição da velocidade do escoamento no túnel de vento. (MENDES, 2020).	68
Figura 29 – Vista superior (esquerda) e vista lateral (direita) do posicionamento dos sensores na balança. Na Figura também são mostradas as força e momentos de interesse (Autor).	70
Figura 30 – Hastes de suporte (Autor).	72
Figura 31 – Estrutura principal da bancada (Autor).	73
Figura 32 – Distribuição dos extensômetros em uma célula de carga do tipo <i>single point</i> (Autor).	74
Figura 33 – Ponte de Wheatstone (ProfElectro, n.d.).	74
Figura 34 – Célula de carga <i>single point</i> (HBM — Hottinger Brüel & Kjær, n.d.). .	75
Figura 35 – Módulo amplificador de sinal HX711 (Autor).	75
Figura 36 – Microcontrolador Arduino Uno (Autor).	76
Figura 37 – Fonte de alimentação de 5 V (Autor).	76
Figura 38 – Diagrama esquemático do sistema de instrumentação (Autor).	77
Figura 39 – Conexões elétricas e proteção dos módulos de aquisição: (a) módulo HX711 com terminais Modu/Dupont crimpados; (b) chicote elétrico organizado e identificado; (c) perfis estruturais e roteamento do chicote para proteção mecânica (Autor).	82

Figura 40 – Detalhes do sistema de calibração e fixação da bancada: (a) roldana de nylon utilizada na calibração da célula de arrasto; (b) perfil tubular 20×20 mm atuando como reforço estrutural do suporte FD, e acima, orelhas de fixação em chapa de aço e insertos roscáveis; (c) fixação da célula de carga de sustentação com parafusos M3 e conjunto de massas para calibração (Autor).	83
Figura 41 – Vista geral da bancada de ensaios finalizada após montagem e implementação das melhorias (Autor).	84
Figura 42 – Estrutura auxiliar modular para determinação do momento de flexão devido à força de arrasto (conforme a figura 29): (a) detalhe da roldana e do sistema de corda tensionada; (b) vista superior do protótipo reduzido com rodas e hastes interligadas montado sobre a estrutura de ensaio (Autor).	85
Figura 43 – Leituras das células de sustentação (F_1 – F_4) e da célula de arrasto (D), mostrando o acoplamento entre as forças devido ao momento de flexão. (Autor).	86
Figura 44 – Modelo CAD do veículo em escala com destaque das regiões de conexão estrutural das asas (Autor).	87
Figura 45 – Impressora Elegoo Saturn 3 Ultra (Autor).	88
Figura 46 – Configurações de impressão em resina ABS-like e SLA (Autor).	89
Figura 47 – Montagem do chassi do protótipo: (a) posicionamento e alinhamento do chassi sobre o gabarito principal; (b) chassi traseiro e dianteiro unidos após fixação com adesivo epóxi (Autor).	90
Figura 48 – Gabaritos de alinhamento do protótipo: (a) gabaritos impressos utilizados para união do chassi e posicionamento correto das rodas; (b) aplicação do gabarito na montagem do veículo em escala. (Autor).	90
Figura 49 – Protótipo em escala sem pacote aerodinâmico: (a) vista em perspectiva do veículo montado; (b) vista superior evidenciando o cockpit e a geometria do chassi; (c) vista inferior destacando os furos de encaixe das hastes de medição do arrasto nas rodas (Autor).	91
Figura 50 – Protótipo em escala com pacote aerodinâmico: (a) vista em perspectiva do veículo montado; (b) vista superior evidenciando o cockpit e a geometria do chassi; (c) vista inferior destacando os furos de encaixe das hastes de medição do arrasto nas rodas (Autor).	92
Figura 51 – Vista superior do protótipo em escala com medição dimensional por paquímetro de escala milimétrica na bancada de ensaios (Autor).	93
Figura 52 – Protótipo em escala com pacote aerodinâmico montado sob a bancada de ensaios (Autor).	93

Figura 53 – Instalação da bancada experimental no túnel de vento, posicionamento do modelo em escala com auxílio do gabarito de altura e conjunto bancada-veículo após o alinhamento (Autor).	94
Figura 54 – Vistas frontal (a), lateral (b) e traseira (c) do protótipo do veículo sem pacote aerodinâmico instalado no túnel de vento antes do início do experimento (Autor).	97
Figura 55 – Forças medidas durante o ensaio do modelo sem pacote aerodinâmico (Autor).	98
Figura 56 – Forças medidas durante o ensaio do modelo sem pacote aerodinâmico, após a correção da interferência do momento de flexão (Autor).	99
Figura 57 – Vistas frontal (a), lateral (b) e traseira (c) do protótipo do veículo com pacote aerodinâmico instalado no túnel de vento antes do início do experimento (Autor).	100
Figura 58 – Forças medidas durante o ensaio do modelo com pacote aerodinâmico (Autor).	101
Figura 59 – Forças medidas durante o ensaio do modelo com pacote aerodinâmico, após a correção da interferência do momento de flexão (Autor).	102
Figura 60 – QR code para acesso ao GIF do ensaio em túnel de vento, evidenciando a flexão estrutural e a geração de força descendente no modelo aerodinâmico (Autor).	103
Figura 61 – Comparação entre as forças aerodinâmicas obtidas por simulação numérica (CFD) e por ensaios experimentais em túnel de vento para o modelo FGR E05 em escala 1:8, nas configurações com e sem pacote aerodinâmico, a 60 km/h (16,67 m/s). (Autor).	105

Lista de tabelas

Tabela 1 – Comparação dos principais parâmetros das malhas geradas para os modelos com e sem pacote aerodinâmico, utilizando elementos do tipo <i>poly-hexcore</i>	53
Tabela 2 – Propriedades do ar Padrão	54
Tabela 3 – Comparação dos parâmetros aerodinâmicos e desempenho entre os modelos com e sem pacote aerodinâmico.	57
Tabela 4 – Forças de arrasto (D) e Sustentação (L) totais por cada componente dos modelos com e sem pacote aerodinâmico.	59
Tabela 5 – Comparação entre os coeficientes aerodinâmicos obtidos numericamente e dados de referência de veículos.	63
Tabela 6 – Propriedades do ar em Brasília com base na atmosfera padrão	64
Tabela 7 – Comparação do número de Reynolds entre o modelo real e o modelo em escala reduzida	65
Tabela 8 – Parâmetros aerodinâmicos e dimensões características do modelo com pacote aerodinâmico nas condições de ajuste de viscosidade e escala reduzida.	66
Tabela 9 – Parâmetros aerodinâmicos e dimensões características do modelo sem pacote aerodinâmico nas condições de ajuste de viscosidade e escala reduzida.	66
Tabela 10 – Comparação dos coeficientes e forças aerodinâmicas para os modelos com e sem pacote aerodinâmico.	66
Tabela 11 – Lista de peças do protótipo	88
Tabela 12 – Valores médios e desvio-padrão das forças medidas durante o ensaio do modelo sem pacote aerodinâmico (Autor).	98
Tabela 13 – Valores médios das forças medidas durante o ensaio do modelo sem pacote aerodinâmico, após a correção da interferência do momento de flexão (Autor).	99
Tabela 14 – Valores médios e desvio-padrão das forças medidas durante o ensaio do modelo com pacote aerodinâmico (Autor).	101
Tabela 15 – Valores médios das forças medidas durante o ensaio do modelo com pacote aerodinâmico, após a correção da interferência do momento de flexão (Autor).	102
Tabela 16 – Valores médios das forças medidas nas células de carga para as configurações com e sem pacote aerodinâmico.	103
Tabela 17 – Momentos de arfagem (p) e rolagem (r) calculados a partir das forças medidas, para as configurações com e sem pacote aerodinâmico.	104

Tabela 18 – Comparação entre as forças aerodinâmicos obtidas numericamente (CFD) e experimentalmente (Túnel de vento) a 60 Km/h (16,67 m/s).	105
---	-----

Lista de abreviaturas e siglas

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Desenho Assistido por Computador
CFD	Dinâmica dos Fluidos Computacional
CLP	Controlador Lógico Programável
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
FCTE	Faculdade de Ciências e Tecnologia em Engenharia
FSAE	Fórmula SAE (Competição Estudantil)
GEKO	$k - \omega$ Generalizado
LEA	Laboratório de Energia e Ambiente
MRF	Múltiplos Quadros de Referência
PID	Controlador Proporcional-Integral-Derivativo
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SLA	Estereolitografia
UnB	Universidade de Brasília
VBS	Visual Basic Script

Lista de símbolos

A	Área de referência
A_v	Área frontal do veículo 1:8
A_t	Área de seção transversal do túnel de vento
a	Distância do centro de gravidade até o eixo dianteiro
B	Fator de Bloqueio
b	Distância do centro de gravidade até o eixo traseiro
C_a	Centro aerodinâmico
C_D	Coefficiente de arrasto
C_f	Coefficiente de atrito
C_L	Coefficiente de sustentação
C_M	Coefficiente de momento
C_g	Centro de gravidade
CP	Centro de Pressão
D	Força de arrasto
D_f	Força de arrasto na dianteira
D_r	Força de arrasto na traseira
F_1, F_2, F_3, F_4	Células de carga responsáveis pela medição da sustentação
F_D	Célula de carga responsável pela medição do arrasto
$f(V)$	Valor calibrado da leitura da célula de carga
g	Aceleração gravitacional
h	Altura de coluna d'água (mmH ₂ O)
h_{CG}	Altura do centro de gravidade
h_f	Altura do ponto de aplicação das forças dianteiras

h_r	Altura do ponto de aplicação das forças traseiras
k	Constante de calibração
L	Força de sustentação
L_f	Força de sustentação negativa na dianteira
L_r	Força de sustentação negativa na traseira
L_x	Comprimento do carro
l_f	Distância do eixo dianteiro até a extremidade frontal do carro
l_r	Distância do eixo traseiro até a extremidade traseira do carro
m_c	Massa do objeto utilizado para a calibração
M	Momento
mg	Peso total do veículo
n	Número total de leituras efetuadas
N_f	Reação normal no eixo dianteiro
N_r	Reação normal no eixo traseiro
p	Momento de arfagem
P	Pressão
P_{total}	Pressão total
$P_{estática}$	Pressão estática
r	Momento de rolagem
r_w	Raio do pneu
Re	Número de Reynolds
t_r	Valor de tara
TW	Distância entre as rodas do mesmo eixo (bitola)
U_τ	Velocidade de fricção
V	Valor bruto lido pela célula de carga
V_∞	Velocidade do escoamento livre

WB	Distância entre o eixo dianteiro e traseiro (entre-eixos)
x_i	Valor da i -ésima leitura do sensor
X	Direção longitudinal do veículo
Y	Direção lateral do veículo
y	Altura da primeira célula da malha
y^+	Valor adimensional desejado
Z	Direção vertical do veículo
$\bar{c}$	Corda média
$\bar{x}$	Média aritmética das medições
μ	Viscosidade dinâmica do fluido
ρ_∞	Massa específica do escoamento livre
ρ_w	Massa específica da água
τ_w	Tensão de cisalhamento na parede
ω_w	Velocidade angular das rodas

Sumário

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Contextualização	21
1.2	Objetivos	23
1.2.1	Objetivos Específicos	23
1.3	Síntese do Trabalho	24
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Aerodinâmica de um FSAE	25
2.1.1	Força de arrasto	26
2.1.1.1	Arrasto Induzido	27
2.1.2	Força descendente	27
2.1.3	Força Lateral	28
2.1.4	Momento Aerodinâmico	28
2.1.5	Teoria das Asas	29
2.1.6	Efeito Venturi e Efeito Solo	30
2.2	Dispositivos Aerodinâmicos de um veículo fórmula	31
2.2.1	Carenagem Frontal	31
2.2.2	Asa Dianteira	32
2.2.3	Asa Traseira	33
2.2.4	Difusor e Assoalho	34
2.2.5	<i>Flip Ups</i>	35
2.3	Distribuição e equilíbrio das forças Aerodinâmicas	36
2.4	Túnel de vento e balança de forças	38
2.4.1	Túnel de vento	38
2.4.2	Balança de forças	40
2.5	Regulamento da FSAE	43
3	MODELAGEM COMPUTACIONAL	45
3.1	Desenvolvimento da Geometria CAD	45
3.1.1	Automação com Python e VBS	45
3.1.2	Sistemas do Veículo	46
3.1.3	Estrutura do Veículo	46
3.1.4	Carenagem e revestimentos	46
3.1.5	Pacote Aerodinâmico	47
3.1.6	Optimização da Geometria	47
3.2	Pré Processamento	48

3.2.1	Definição do Domínio	49
3.2.2	Criação da malha	49
3.2.3	Tratamento da Camada	50
3.2.4	Malha de Volume	51
3.2.5	Condições de Contorno	54
3.2.6	Modelo de Turbulência	54
3.2.7	Estratégia de Inicialização e Convergência	55
3.3	Resultados	56
3.3.1	Convergência da malha	61
3.3.2	Comparação com Veículos Conhecidos	62
4	CONSIDERAÇÕES PARA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL	64
4.1	Similaridade Aerodinâmica	64
4.2	Considerações	65
4.3	Novos Resultados	66
5	METODOLOGIA EXPERIMENTAL	67
5.1	Túnel de vento	67
5.1.1	Determinação da velocidade do escoamento no túnel de vento	68
5.2	Balança de forças	69
5.2.1	Estrutura	70
5.2.2	Sensores e Instrumentação	73
5.2.3	Calibração das Células de Carga	77
5.2.4	Firmware e Logger	78
5.2.4.1	Compensação de Acoplamento e Correção de Momento de Flexão	80
5.2.4.2	Integração entre o Firmware e o Logger	81
5.2.5	Montagem e melhorias	81
5.3	Análise e medição do momento de flexão	84
5.4	Prototipagem em impressão 3D	87
5.5	Preparação para o ensaio	94
6	RESULTADOS	96
6.1	Modelo sem pacote aerodinâmico	96
6.2	Modelo com pacote aerodinâmico	99
6.3	Forças e momentos	103
6.4	Comparação entre CFD e Ensaios Experimentais	104
7	CONCLUSÃO	107
7.1	Principais conclusões	107
7.2	Limitações do estudo	108
7.3	Recomendações para trabalhos futuros	109

REFERÊNCIAS 111

Appendices 115

8 – FIRMWARE EM C 116

9 – LOGGER EM PYTHON 130

1 Introdução

1.1 Contextualização

A aerodinâmica exerce um papel central em diversos ramos da engenharia contemporânea. No setor aeroespacial, sua aplicação é indispensável para garantir a estabilidade, a sustentação e a eficiência energética das aeronaves. Na indústria automotiva, contribui significativamente para a redução do consumo de combustível, o aumento da estabilidade veicular e a melhoria do desempenho dinâmico. Já em aplicações industriais, como em turbomáquinas, sistemas de ventilação e na geração de energia eólica, o controle do escoamento de ar é igualmente crucial. O contínuo avanço de métodos numéricos e técnicas experimentais tem ampliado a capacidade de projetar sistemas mais eficientes e seguros, consolidando a aerodinâmica como um campo estratégico para o progresso tecnológico e a inovação em engenharia. ([ANDERSON, 2010](#); [WHITE, 2011](#)).

A SAE (Society of Automotive Engineers) é uma organização técnico-científica que estabelece normas e promove a disseminação de conhecimento nas áreas automotiva e aeroespacial. Entre suas iniciativas educacionais, destaca-se a *Fórmula SAE*, competição acadêmica internacional em que equipes projetam, constroem e validam protótipos veiculares de alto desempenho.

No contexto do automobilismo de competição, a aerodinâmica deixou de ser apenas um mero diferencial e consolidou-se como um dos pilares fundamentais para o desempenho veicular. Seu papel é decisivo na maximização da aderência, na estabilidade em altas velocidades e na redução do tempo de volta, contribuindo diretamente para a performance global do veículo em pista. Essa realidade também se reflete nos veículos de pequeno porte utilizados em competições acadêmicas, como os protótipos do tipo Fórmula SAE (FSAE). Embora operem em faixas de velocidade inferiores às categorias profissionais, os monopostos FSAE percorrem circuitos repletos de curvas fechadas e retas curtas, o que torna a geração de forças aerodinâmicas verticais, como a força vertical descendente, um fator crítico para o desempenho dinâmico em curvas ([KATZ, 2016](#); [MILLIKEN](#); [MILLIKEN, 1995](#)).

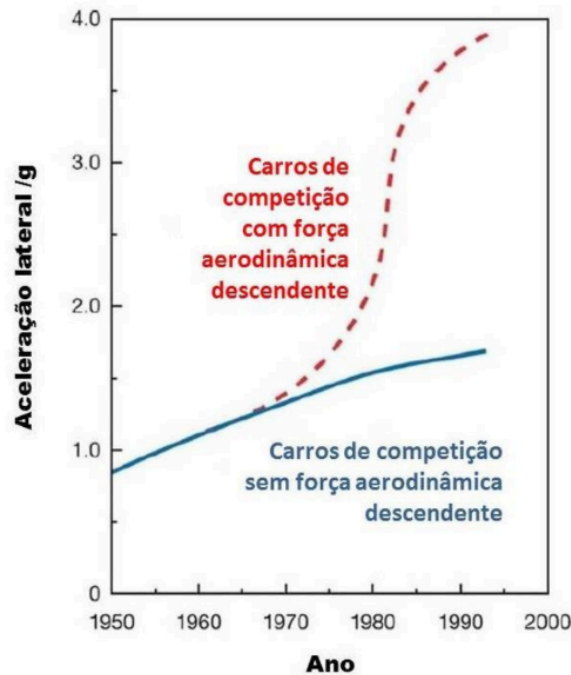


Figura 1 – Evolução da aceleração lateral de veículos de competição com e sem força aerodinâmica descendente ao longo das décadas. Adaptado de (KATZ, 2016).

Como ilustrado na Figura 1, a introdução de dispositivos aerodinâmicos na década de 1960 revolucionou o desempenho dinâmico dos veículos de competição, permitindo acelerações laterais significativamente superiores devido ao aumento da força descendente. Esse avanço marcou o início da era moderna da aerodinâmica aplicada ao automobilismo.

Nessa perspectiva, o projeto de dispositivos aerodinâmicos, como asas dianteiras e traseiras, difusores e assoalhos com efeito solo, tem como objetivo maximizar a aderência dos pneus ao solo sem comprometer significativamente o arrasto aerodinâmico. A correta implementação dessas soluções pode resultar em melhorias substanciais na dirigibilidade, redução dos tempos de volta e aumento da eficiência energética do veículo (KATZ, 2016; ZHANG; TOET; ZERIHAN, 2006).

O uso de simulações baseadas em Dinâmica dos Fluidos Computacional, usualmente conhecida por sua sigla inglesa (CFD), consolidou-se como uma ferramenta indispensável no desenvolvimento aerodinâmico de veículos. Através dessas simulações, é possível prever o comportamento do escoamento ao redor da carroceria, estimar coeficientes de arrasto e sustentação, além de visualizar zonas de separação e vórtices indesejados. Contudo, a acurácia dos modelos numéricos depende de uma série de fatores, como malha computacional, condições de contorno e modelos de turbulência, o que torna a validação experimental mais um passo para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos por CFD (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007a).

Nesse sentido, a abordagem experimental se apresenta como um recurso fundamental para a verificação empírica do desempenho aerodinâmico previsto numericamente. No

que se refere à aerodinâmica, os ensaios em túnel de vento constituem um dos métodos experimentais mais antigos e consolidados. Por meio da construção de modelos físicos em escala reduzida e da realização de ensaios em túnel de vento, é possível medir diretamente os efeitos dos dispositivos aerodinâmicos aplicados ao veículo, como as forças de arrasto e sustentação. A metodologia experimental permite não apenas validar os resultados obtidos por meio de simulações, mas também compreender fenômenos que, por limitações computacionais ou de modelagem, podem não ser plenamente capturados no ambiente virtual (BARLOW; RAE; POPE, 2015; LARSEN, 2021).

O presente trabalho busca estabelecer uma relação de retroalimentação entre a modelagem computacional e os ensaios experimentais. O experimento em túnel de vento servirá como base de validação dos modelos numéricos desenvolvidos em CFD, enquanto as simulações fornecerão embasamento técnico para justificar ou não a adoção de dispositivos aerodinâmicos em veículos Fórmula SAE.

1.2 Objetivos

Este trabalho possui dois objetivos principais. O primeiro consiste na realização de simulações numéricas em Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), conduzidas de forma a reproduzir o comportamento aerodinâmico do veículo com o máximo de realismo possível, permitindo avaliar a eficácia do uso dos dispositivos aerodinâmicos. O segundo, e mais importante, é a validação experimental dos resultados numéricos (incluindo simplificações necessárias para representar as mesmas condições de escoamento observadas no túnel de vento), por meio da construção de modelos físicos em escala reduzida e do desenvolvimento de uma bancada de testes devidamente instrumentada para a medição das forças e momentos atuantes.

A validação experimental constitui o cerne deste trabalho, servindo como base para verificar a concordância entre os resultados obtidos por CFD e o comportamento real do sistema.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar simulações computacionais utilizando CFD, com o objetivo de comparar os resultados obtidos numericamente com os dados experimentais.
- Comparar o desempenho do veículo com e sem o pacote aerodinâmico, avaliando o impacto no tempo de volta por meio de uma análise computacional de desempenho.
- Fabricar modelos físicos em escala reduzida de um veículo FSAE, por meio de manufatura aditiva, para ensaio experimental.

- Desenvolver uma bancada experimental adaptada para ensaios em túnel de vento, dotada de instrumentação adequada para medição de forças aerodinâmicas e momentos atuantes no modelo com e sem pacote aerodinâmico.
- Ensaiar e analisar os resultados experimentais obtidos, destacando as contribuições dos dispositivos aerodinâmicos para a melhoria do desempenho do veículo, bem como a correlação entre os dados experimentais e numéricos.

1.3 Síntese do Trabalho

Inicialmente, no capítulo 2, será apresentado a fundamentação teórica relacionada à aerodinâmica aplicada a veículos do tipo Fórmula, com ênfase nos protótipos da categoria Fórmula SAE (FSAE). Serão abordadas as principais equações e os efeitos aerodinâmicos fundamentais, bem como os dispositivos mais comumente empregados nesse contexto.

Na sequência, mostra-se a distribuição e o equilíbrio das forças aerodinâmicas atuantes sobre o veículo, destacando sua relevância para o desempenho e a estabilidade do sistema.

Em seguida, ainda no âmbito teórico, são apresentados os modelos de túnel de vento e os sistemas de balanças comumente utilizados em ensaios aerodinâmicos, incluindo configurações específicas para testes com veículos em túneis de vento.

No Capítulo 3, aborda-se o desenvolvimento e a modelagem dos dispositivos aerodinâmicos em ambiente CAD, tanto para fins de simulação numérica quanto para experimentação física. Detalha-se o processo de preparação da geometria para a simulação, seguido pelas etapas de pré-processamento, definição do domínio computacional, geração da malha, seleção do modelo de turbulência, imposição das condições de contorno e, por fim, a apresentação dos resultados obtidos.

No Capítulo 4, são realizadas as considerações necessárias à análise comparativa entre o modelo numérico e o modelo experimental proposto neste trabalho. Além disso, descreve-se o processo de fabricação do protótipo físico por meio de impressão 3D.

No Capítulo 5, apresenta-se detalhadamente o método experimental adotado, incluindo o processo de fabricação e montagem da balança de forças utilizada nos ensaios.

No Capítulo 6, apresenta-se detalhadamente os resultados empíricos, comparações entre as metodologias e discussões.

No capítulo 7, apresenta-se a conclusão do trabalho, as limitações do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

2 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os principais fundamentos teóricos necessários para o desenvolvimento deste trabalho, abordando conceitos de aerodinâmica aplicada a veículos, os tipos de dispositivos aerodinâmicos mais comumente utilizados e permitidos pelo regulamento da competição FSAE e uma revisão da literatura relacionada a ensaios em túnel de vento.

2.1 Aerodinâmica de um FSAE

Ao se deslocar através do ar, um veículo está sujeito a três principais forças aerodinâmicas: o arrasto, a sustentação e as forças laterais, associadas à estabilidade direcional (Fig. 2). Em projetos FSAE, o foco concentra-se especialmente na redução de arrasto e na geração de sustentação, visando aumentar a aderência dos pneus ao solo, contribuindo diretamente para a redução dos tempos de volta (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995; GUPTA; SAXENA, 2017).

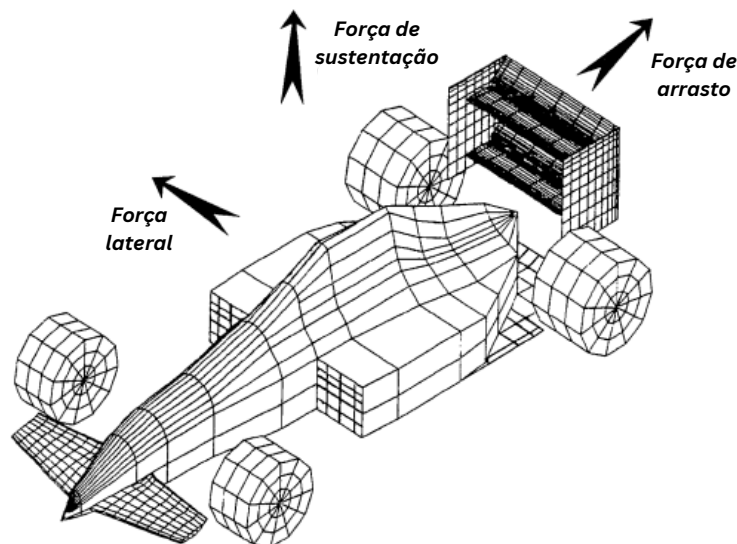


Figura 2 – Imagem adaptada de (KATZ, 2016)

Em protótipos do tipo FSAE, a aerodinâmica é explorada com o objetivo de maximizar a força vertical descendente (*downforce*) e minimizar o arrasto aerodinâmico, respeitando as restrições impostas pelo regulamento (Cap. 2.5) e pelas limitações construtivas do projeto (WORDLEY; SAUNDERS, 2006).

As equipes exploram diversos princípios aerodinâmicos, como o efeito Venturi, o efeito solo e a geração e controle de vórtices por meio de dispositivos específicos. Esses conceitos são aplicados no projeto de asas dianteiras e traseiras, assoalhos, carenagens e defletores, com o propósito de otimizar o desempenho do veículo em diferentes condições de pista e nas distintas provas da competição (KATZ, 2016).

2.1.1 Força de arrasto

Quando um fluido escoar sobre uma superfície sólida, ocorre uma resistência ao movimento relativo entre o fluido e o objeto. Em aerodinâmica, essa resistência é denominada força de arrasto (*drag*), que atua na direção oposta ao deslocamento do corpo em relação ao fluido (ANDERSON, 2010).

O arrasto total que atua sobre um carro de corrida pode ser decomposto em dois principais componentes: o arrasto por atrito e o arrasto de forma (ou de pressão). O arrasto por atrito ocorre devido à presença da camada limite do escoamento nas paredes do veículo. Nesta região, devido à efeitos viscosos, há um alto gradiente de velocidade, proporcionando uma elevada tensão de cisalhamento no escoamento, que se manifesta como uma resistência ao movimento do veículo. (WHITE, 2011).

Por sua vez, o arrasto de forma está relacionado à geometria do corpo e à distribuição de pressão ao longo de sua superfície externa. À medida que o ar escoar ao redor do veículo, estabelece-se uma região de alta pressão na parte frontal e uma zona de baixa pressão na região traseira. Essa diferença de pressões resulta em uma força que atua contra o movimento do veículo. Em corpos rombudos, como automóveis, o arrasto de forma constitui uma parcela significativa do arrasto total (HUCHO, 1998; ANDERSON, 2010).

A força de arrasto total é diretamente proporcional à área frontal do veículo e ao quadrado da velocidade do escoamento. E pode ser normalmente equacionada pela seguinte expressão:

$$D = \frac{1}{2} \rho_{\infty} C_D A V_{\infty}^2 \quad (2.1)$$

Onde, ρ_{∞} representa a massa específica do fluido no escoamento livre, C_D é o coeficiente adimensional de arrasto, A é a área de referência, e V_{∞} é a velocidade do escoamento livre.

O coeficiente de arrasto C_D depende fortemente do formato do corpo, da rugosidade superficial, da direção e do regime do escoamento (laminar ou turbulento), caracterizado pelo número de Reynolds (Re) (WHITE, 2011). À medida que a velocidade aumenta, os efeitos de destacamento (separação da camada limite) do escoamento tornam-se mais intensos, o que acentua a formação de regiões de baixa pressão na traseira do carro. Isso

resulta em maior arrasto de forma e, consequentemente, em maior potência exigida para manter ou aumentar a velocidade (ANDERSON, 2010).

Em altas velocidades, o arrasto aerodinâmico torna-se dominante sobre outras resistências. Veículos de competição, no entanto, podem adotar valores maiores de C_D intencionalmente, para gerar mais sustentação negativa (*downforce*), necessária para aumentar a aderência em curvas (HUCHO, 1998).

Além disso, fatores como transição da camada limite, presença de dispositivos aerodinâmicos (asas, difusores, (*splitters*) e sistemas de arrefecimento influenciam diretamente o valor de C_D . Um projeto aerodinâmico eficiente busca manter a camada limite aderida à superfície pelo maior tempo possível, minimizando a formação da esteira turbulenta atrás do veículo, reduzindo o arrasto de forma. Para tanto, utilizam-se superfícies suaves e contínuas, bem como carenagens para proteger componentes expostos, como elementos da suspensão (KATZ, 2016; HUCHO, 1998).

2.1.1.1 Arrasto Induzido

O arrasto induzido surge exclusivamente em asas de envergadura finita quando elas geram sustentação. Ele é causado pela formação de vórtices nas pontas da asa, resultantes da diferença de pressão entre a parte inferior e superior da asa. Esses vórtices criam um escoamento descendente, chamado *downwash*, que inclina o vetor da sustentação para trás. Essa inclinação gera uma força de arrasto adicional chamada de arrasto induzido (ANDERSON, 2010).

O arrasto induzido está diretamente relacionado à quantidade de sustentação produzida e ao formato da asa. Ele aumenta com o quadrado do coeficiente de sustentação e diminui com o aumento do alongamento da asa (razão entre envergadura e área da asa). A eficiência aerodinâmica da asa também afeta o valor desse arrasto, podendo ser melhorada com formatos de asas mais eficientes (ANDERSON, 2010).

2.1.2 Força descendente

Em decorrência da interação com o escoamento ao redor do veículo, surgem forças aerodinâmicas que atuam sobre a superfície do corpo. Essas forças podem estar orientadas para cima, caracterizando a sustentação, ou para baixo, resultando na força descendente, comumente denominada *downforce*. A direção e a magnitude dessas forças dependem da geometria e da orientação dos dispositivos aerodinâmicos presentes no corpo, como asas, difusores e a própria carroceria do veículo (HUCHO, 1998).

A força de sustentação pode ser expressa pela seguinte equação:

$$L = \frac{1}{2} \rho_{\infty} C_L A V_{\infty}^2 \quad (2.2)$$

Nessa equação, o coeficiente adimensional de sustentação C_L sintetiza a influência da geometria do corpo, do ângulo de ataque e das condições do escoamento, incluindo efeitos viscosos e compressíveis sobre a força gerada. Em condições de escoamento aderente, ou seja, sem separação do escoamento, o coeficiente C_L pode ser considerado aproximadamente constante, o que implica que a sustentação varia com o quadrado da velocidade. A obtenção do valor de C_L é realizada, em geral, por meio de simulações numéricas baseadas em CFD ou por meio de experimentos em túnel de vento (ANDERSON, 2010).

No contexto de aplicações automotivas, a utilização de asas com perfis invertidos permite gerar uma força aerodinâmica direcionada para baixo, pressionando o veículo contra o solo e aumentando sua aderência. Esse incremento na força normal sobre os pneus resulta em maior atrito com o solo, o que favorece o desempenho em curvas e frenagens. No entanto, esse ganho em performance está associado a um aumento no arrasto aerodinâmico, o que pode comprometer a velocidade máxima do veículo e elevar o consumo energético (KATZ, 2016).

2.1.3 Força Lateral

As forças aerodinâmicas laterais correspondem aos esforços que atuam perpendicularmente à direção do movimento do veículo. Tais forças têm como principais causas o escoamento assimétrico ao redor da estrutura veicular e a incidência de ventos laterais, sendo particularmente relevantes em situações de alta velocidade ou durante a realização de curvas. Seu efeito é significativo sobre a estabilidade direcional (THAPA, 2021).

A geração da força lateral está associada a fatores externos, como ventos cruzados, ou a características geométricas do veículo que provocam variações na distribuição de pressão entre seus lados. A ação do vento sobre uma das faces do veículo tende a criar uma zona de alta pressão no lado de incidência e uma zona de baixa pressão no lado oposto, resultando em uma força resultante lateral que pode induzir deslocamentos, instabilidades ou alterações na trajetória. Adicionalmente, essas forças aerodinâmicas laterais podem ser intensificadas pelos movimentos de rolagem e guinada do veículo, especialmente durante manobras como entradas e saídas de curvas. A interação entre a aerodinâmica e a cinemática veicular é um fator crítico no estudo da estabilidade e do controle de veículos em condições reais de operação (KATZ, 2016; THAPA, 2021).

2.1.4 Momento Aerodinâmico

O momento aerodinâmico M caracteriza a tendência de rotação de um veículo em torno de um ponto de referência, geralmente o centro de gravidade, como resultado da distribuição assimétrica das pressões aerodinâmicas ao longo da superfície do corpo (ANDERSON, 2010).

Esse momento pode ser calculado por meio da seguinte equação:

$$M = \frac{1}{2} \rho_{\infty} \bar{c} C_M A V_{\infty}^2 \quad (2.3)$$

Onde, $\bar{c}$ é a corda média aerodinâmica, uma medida representativa da profundidade média da superfície de sustentação, C_M é o coeficiente adimensional de momento, que quantifica a tendência do veículo a girar em torno de seu centro de gravidade.

No contexto automotivo, os momentos aerodinâmicos exercem influência significativa sobre a estabilidade dinâmica do veículo, afetando diretamente o comportamento em curvas, frenagens e acelerações. O desequilíbrio de forças entre os eixos dianteiro e traseiro pode induzir momentos de arfagem ou rolagem, impactando a distribuição de carga sobre os pneus podendo afetar a eficiência de tração e frenagem (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995; KATZ, 2016).

Elementos como asas, difusores e defletores devem ser projetados considerando não apenas os coeficientes de sustentação e arrasto, mas também o momento resultante, a fim de garantir um balanço aerodinâmico adequado em diferentes condições operacionais. A quantificação precisa de C_M é normalmente obtida por meio de simulações CFD ou ensaios em túnel de vento (WRIGHT; COOPER, 2009).

2.1.5 Teoria das Asas

Toda asa, quando observada em vista planar, apresenta o formato de um aerofólio (Fig. 3), cuja geometria é cuidadosamente projetada para manipular o escoamento do ar e gerar forças aerodinâmicas. Em perfis assimétricos ou operando com ângulo de ataque positivo, o escoamento se acelera sobre o extradorso, provocando baixa pressão nessa região. Por outro lado, no intradorso, o escoamento sofre menor aceleração, mantendo uma pressão relativamente mais elevada. Essa diferença de pressão gera uma força resultante orientada perpendicularmente à direção do escoamento livre, caracterizando o fenômeno da sustentação (ANDERSON, 2010).

A geometria de um perfil aerodinâmico é caracterizada principalmente pelo bordo de ataque arredondado, o bordo de fuga afilado e a linha de corda, que conecta essas duas extremidades. Além disso, parâmetros como a linha média (camber) e a distribuição de espessura ao longo da corda são fundamentais para a geração de sustentação e o controle do escoamento (Fig. 3) (ANDERSON, 2010).

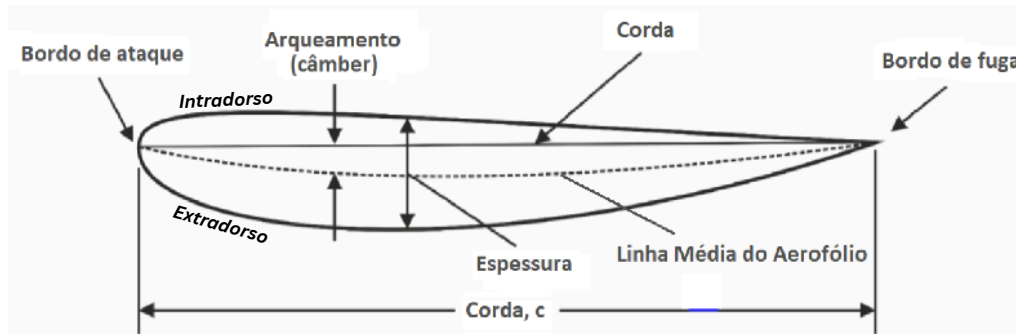


Figura 3 – Imagem adaptada de (SEWARD, 2014)

Dois pontos de referência são particularmente relevantes na análise aerodinâmica de perfis: o centro aerodinâmico e o centro de pressão. O centro aerodinâmico é definido como o ponto ao longo da corda do perfil no qual o momento de arfagem permanece aproximadamente constante, independentemente das variações no ângulo de ataque (CENTER, 2020a). Já o centro de pressão corresponde ao ponto onde se pode considerar que atua a força aerodinâmica resultante; sua posição varia em função do ângulo de ataque e da distribuição de pressão ao longo do perfil (CENTER, 2020b).

No contexto automotivo, esses perfis são frequentemente utilizados de forma invertida, com o objetivo de gerar força descendente (Fig. 3). A otimização da geometria do perfil é essencial para alcançar um equilíbrio entre sustentação negativa (downforce) e resistência ao avanço (arrasto), impactando diretamente o desempenho em pista (KATZ, 2016).

A compreensão e o controle preciso desses parâmetros são cruciais no projeto de dispositivos como asas dianteiras, asas traseiras e difusores, permitindo maximizar a performance veicular sem comprometer a estabilidade e a segurança (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995).

2.1.6 Efeito Venturi e Efeito Solo

O efeito Venturi descreve o aumento da velocidade e a redução da pressão de um fluido ao passar por um canal estreito. Esse comportamento é descrito pela equação de Bernoulli (WHITE, 2011):

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(V_2^2 - V_1^2) \quad (2.4)$$

Onde, P_1 e P_2 são as pressões estáticas nos pontos 1 e 2, e V_1 e V_2 são as velocidades do escoamento nesses respectivos pontos. A equação expressa a conservação de energia para um fluido incompressível e em regime permanente, relacionando variações de pressão e velocidade.

No contexto automotivo, esse princípio é explorado por meio da geometria do assoalho do veículo, que pode ser projetado com um perfil convergente-divergente, análogo a um tubo de Venturi (Fig. 4). Nesse arranjo, o escoamento acelera ao passar pela região de menor seção sob o carro, provocando uma queda significativa da pressão. A baixa pressão gerada nessa zona inferior resulta em *downforce*, esse fenômeno é conhecido como efeito solo (HUCHO, 1998).

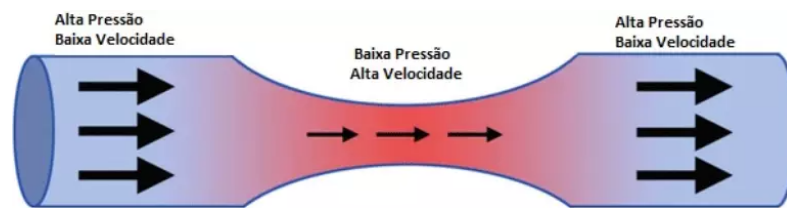


Figura 4 – Tubo de Venturi (COLUNA, 2022)

O efeito solo permite a geração de força descendente sem penalizar o arrasto de forma tão significativa quanto dispositivos externos, como asas. Assim, possibilita maior capacidade de tração, estabilidade e desempenho em curvas e frenagens, sem o acréscimo de massa ao sistema (KATZ, 2016).

No entanto, a eficiência desse efeito depende criticamente da altura do assoalho em relação ao solo. Uma altura muito pequena pode causar bloqueio do escoamento (*choking*), enquanto uma altura muito grande reduz o gradiente de pressão (SEWARD, 2014).

2.2 Dispositivos Aerodinâmicos de um veículo fórmula

2.2.1 Carenagem Frontal

A carenagem frontal de um veículo Fórmula SAE (Fig. 5), localizada na extremidade dianteira do chassi, é um componente obrigatório, conforme estabelecido pelo regulamento da competição (SAE International, 2025). Essa região é exposta às maiores pressões dinâmicas, resultantes da desaceleração do escoamento ao encontrar a parte frontal do carro, o que pode ser explorado estrategicamente para gerar força descendente ou para minimizar o arrasto.

Em projetos com foco em velocidade em linha reta, prioriza-se a redução do arrasto, evitando geometrias que aumentem a resistência como efeito colateral da geração de *downforce*. Por outro lado, em configurações de alto desempenho dinâmico, a carenagem

pode ser integrada ao sistema aerodinâmico para otimizar a distribuição do escoamento em direção ao assoalho (KATZ, 2016).

Além disso, carenagens mais altas tendem a desviar uma maior quantidade de escoamento para a parte inferior do veículo, o que pode afetar negativamente o desempenho do efeito solo. Portanto, o projeto da carenagem exige um equilíbrio entre altura, forma e acoplamento com os demais dispositivos aerodinâmicos, de modo a preservar a eficiência global do conjunto (MILLIKEN; MILLIKEN, 1995).



(a)



(b)

Figura 5 – Carenagem frontal de um FSAE. (a) (LAD et al., 2020); (b) (OXYZOGLU, 2017)

2.2.2 Asa Dianteira

A asa dianteira de um veículo FSAE (Fig. 6) é o primeiro componente a interagir com o escoamento de ar, desempenhando um papel fundamental na geração de sustentação negativa (*downforce*) e na otimização do escoamento de ar para os demais sistemas aerodinâmicos do carro. Por meio de múltiplos elementos e flaps ajustáveis, essa asa é responsável por aproximadamente 20% a 30% da sustentação negativa total do veículo (OXYZOGLU, 2017).

Enquanto perfis simples, utilizados nas asas, tendem a entrar em *stall* em velocidades mais baixas e apresentam aumento considerável do arrasto em ângulos de ataque elevados, configurações com múltiplos elementos de asas são capazes de manter a geração de sustentação por um intervalo maior de velocidades. Isso se deve à melhor distribuição de pressão sobre as superfícies da asa (SEWARD, 2014).

Os (*endplates*) são estruturas laterais instaladas nas extremidades das asas com a finalidade de mitigar a interferência entre as regiões de alta e baixa pressão, diminuindo o arrasto induzido. Complementarmente, os (*footplates*), posicionados na base dos (*endplates*), geram vórtices que promovem o selamento da região inferior do veículo (PATIL et al., 2019).

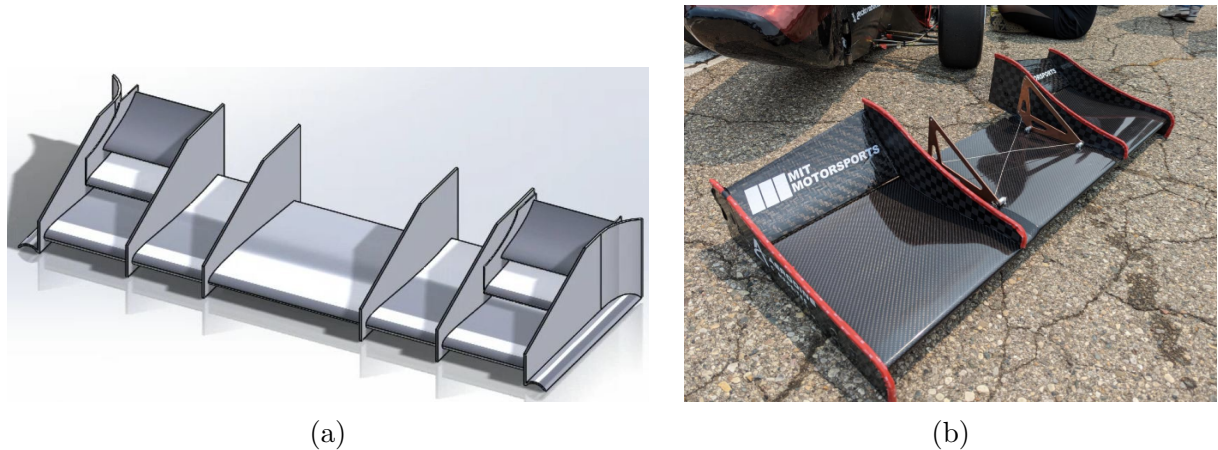


Figura 6 – Asas dianteiras de um FSAE. (a) (LOPEZ, 2017); (b) (KOGAPPA, n.d.)

2.2.3 Asa Traseira

A asa traseira (Fig. 7) contribui com aproximadamente um terço da sustentação negativa total do veículo. Comumente, a asa traseira é composta por três a quatro perfis aerodinâmicos múltiplos, interligados por *endplates*. Esses perfis, geralmente equipados com *flaps* ajustáveis, são projetados para gerar altos níveis de sustentação negativa, permitindo maiores ângulos de ataque sem induzir separação precoce do escoamento (SEWARD, 2014).

Um recurso adicional frequentemente utilizado nas asas traseiras é o *Gurney flap*, uma pequena aba instalada na extremidade posterior do perfil. Esse componente melhora a eficiência aerodinâmica ao aumentar a pressão no lado de alta pressão e ao estabilizar o escoamento na face de baixa pressão, retardando a separação do escoamento. Outro dispositivo aplicado com o intuito de aprimorar o desempenho da asa traseira são os *louvres*, aberturas inseridas nos *endplates* que permitem a comunicação entre as regiões de diferentes pressões. Sua função é aliviar gradientes de pressão entre as faces interna e externa dos *endplates* (KATZ, 2016).

As asas traseiras são usualmente ajustáveis para otimizar o desempenho em diferentes tipos de evento. Em pistas com predominância de retas longas, equipes tendem a reduzir o ângulo de ataque para minimizar o arrasto. Já em pistas com curvas acentuadas, aumentam-se os ângulos para maximizar o *downforce* (OXYZOGLU, 2017).

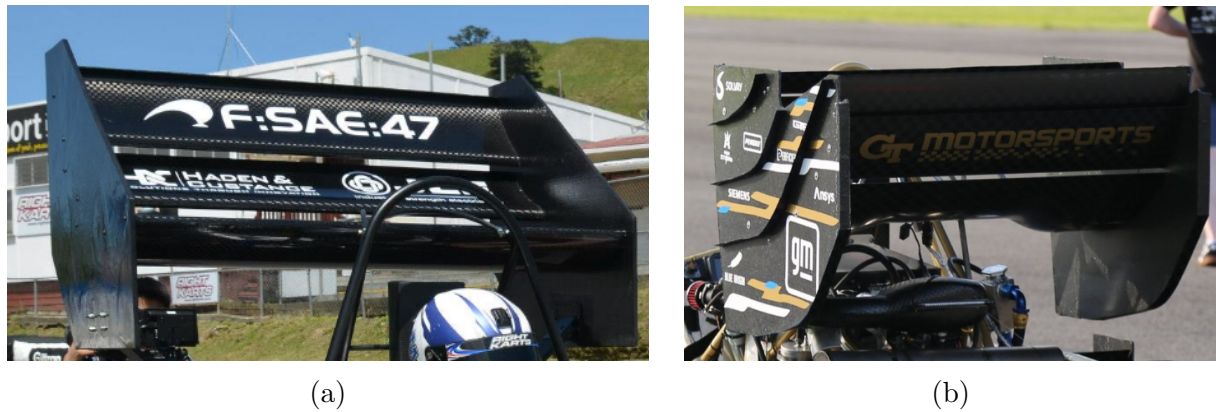


Figura 7 – Asas traseiras de um FSAE. (a) (ztikmaenn, 2015); (b) (Georgia Tech Motorsports, n.d.)

2.2.4 Difusor e Assoalho

O assoalho é amplamente reconhecido como o componente aerodinâmico mais eficiente em veículos de Fórmula SAE, devido à sua capacidade de gerar elevado (*downforce*) por meio do efeito solo (KATZ, 2016; SEWARD, 2014). Esse efeito é obtido pela aceleração do escoamento de ar sob o carro, o que reduz significativamente a pressão nessa região conforme descrito pela equação de Bernoulli 2.4.

Na parte traseira do veículo, o difusor desacelera o escoamento de ar proveniente do *venturi* formado sob o carro. Isso permite que a pressão permaneça reduzida por mais tempo, ampliando a geração de (*downforce*) (KATZ, 2016).

A inclinação do difusor deve ser cuidadosamente projetada para evitar a separação do escoamento de ar. Inclinações excessivas podem levar à formação de zonas de recirculação, o que eleva o arrasto e compromete o desempenho aerodinâmico. Em contrapartida, uma inclinação otimizada mantém o escoamento aderido à superfície do difusor, favorecendo a eficiência do sistema (SEWARD, 2014).

A Figura 8 apresenta a configuração típica do assoalho e difusor empregados em veículos.

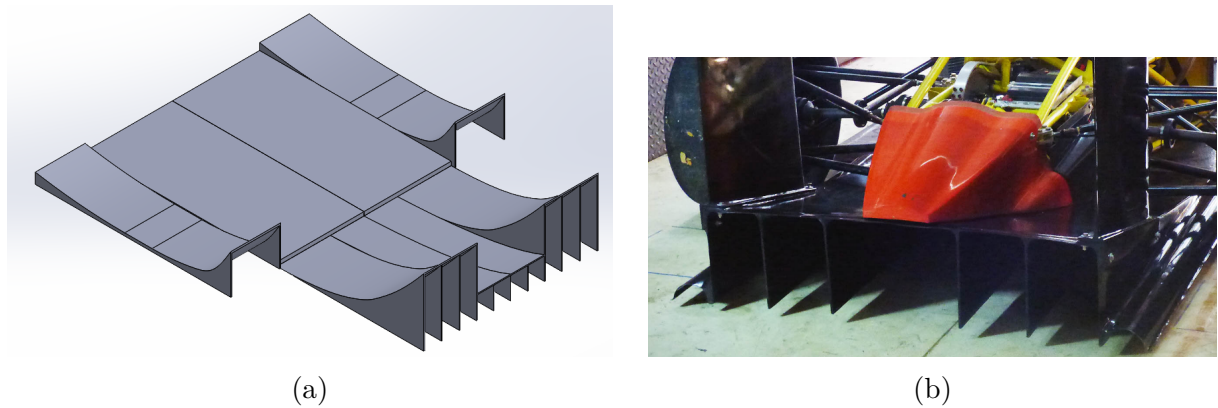


Figura 8 – Difusor e assoalho de um veículo de competição. (a) (JADHAV, 2020); (b) (Ludemann Engineering, n.d.)

2.2.5 *Flip Ups*

Rodas expostas representam um dos maiores desafios aerodinâmicos em veículos de Fórmula SAE, sendo a antítese do desempenho ideal. Essas rodas contribuem significativamente para o aumento do arrasto e geram sustentação positiva — uma força oposta à desejada força descendente (*downforce*) (KATZ, 2016).

Além disso, o escoamento gerado pelas rodas é altamente turbulento e caótico, dificultando sua utilização eficiente por dispositivos aerodinâmicos posicionados posteriormente no carro, como asas e difusores. A sustentação gerada pelas rodas expostas pode reduzir substancialmente a eficácia aerodinâmica do veículo. Estudos indicam que a sustentação positiva gerada pelas rodas em movimento pode diminuir em até 11% a força descendente total de um carro FSAE, e podem representar até 25%–30% do arrasto total em veículos de competição (HUCHO, 1998).

Por restrições regulamentares, o encapsulamento das rodas não é permitido. Uma estratégia amplamente adotada consiste na implementação de *flip-ups*, posicionados imediatamente à frente das rodas traseiras. Esses elementos têm como função redirecionar o escoamento sobre as rodas traseiras, ajudando a mitigar a sustentação indesejada, gerar força descendente adicional e proteger a asa traseira da perturbação causada pelo ar turbulento oriundo das rodas (OXYZOGLU, 2017).

A Figura 9 apresenta os defletores (*flip-ups*) empregados em veículos FSAE. Na imagem 9a observa-se que o defletor possui elementos de asas, indicando que esse defletor também serve como dispositivo gerador de *downforce*, semelhante a uma asa lateral.



Figura 9 – *flip-ups* em um FSAE. (OXYZOGLU, 2017)

2.3 Distribuição e equilíbrio das forças Aerodinâmicas

O equilíbrio entre o *downforce* nos eixos dianteiro e traseiro é fundamental para manter a aderência do veículo. Apesar da simetria do carro facilitar o balanceamento lateral, a interferência do escoamento entre frente e traseira dificulta o ajuste longitudinal. A distribuição ideal varia conforme o tipo de pista (WRIGHT; COOPER, 2009).

Um carro com maior *downforce* traseiro pode ter a frente mais leve, resultando em menor aderência dos pneus dianteiros, causando subesterço. Por isso, é essencial buscar uma configuração mais equilibrada. As asas são os principais elementos de ajuste fino do equilíbrio aerodinâmico, que é definido pela posição relativa entre o centro de pressão (CP) e o centro de gravidade (Cg). Um CP levemente atrás do Cg proporciona maior estabilidade em altas velocidades (KATZ, 2016).

O balanceamento das forças, ajuda a reduzir os momentos de rolagem e arfagem durante curvas, frenagens e acelerações. Isso estabiliza as forças verticais aplicadas aos pneus e melhora a estabilidade do veículo. A performance do carro, especialmente próxima ao limite de aderência, torna-se mais previsível. Quando as forças aerodinâmicas dianteiras e traseiras são conhecidas, é possível estimar o equilíbrio aerodinâmico com base no diagrama de corpo livre, como mostrado na Figura 10.

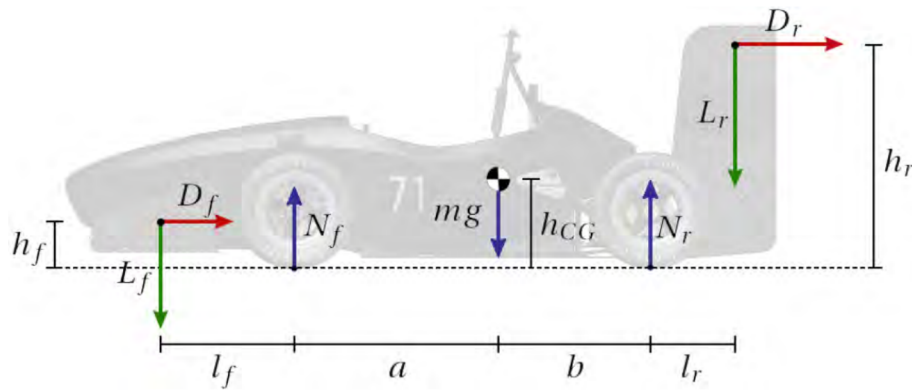


Figura 10 – Diagrama de corpo livre de um carro FSAE para estimativa de balanço aerodinâmico (DAHLBERG, 2014).

A partir do diagrama apresentado, é possível realizar a análise do equilíbrio estático longitudinal do veículo. Essa análise permite estimar a posição do centro de pressão (CP) resultante das forças aerodinâmicas, bem como calcular a distribuição de carga vertical entre os eixos dianteiro e traseiro (DAHLBERG, 2014).

Para curvas de baixa a média velocidade, é desejável que o centro de pressão esteja ligeiramente deslocado para a traseira, a fim de evitar a ocorrência de sobreesterço na entrada da curva. Por outro lado, em curvas de alta velocidade, um centro de pressão mais próximo ou ligeiramente à frente do centro de gravidade (CG) pode ser vantajoso para melhorar a estabilidade direcional (WRIGHT; COOPER, 2009).

O comportamento do veículo pode ser classificado de acordo com o balanceamento aerodinâmico entre os eixos. Um carro com maior força descendente na dianteira (ou menor na traseira) tende a apresentar sobreesterço (11a). Já um veículo com mais força descendente na traseira tende ao subesterço (11b). Por fim, quando há um equilíbrio adequado entre as forças descendentes nos dois eixos, o comportamento é considerado neutro, favorecendo uma dirigibilidade previsível e estável (KATZ, 2016).

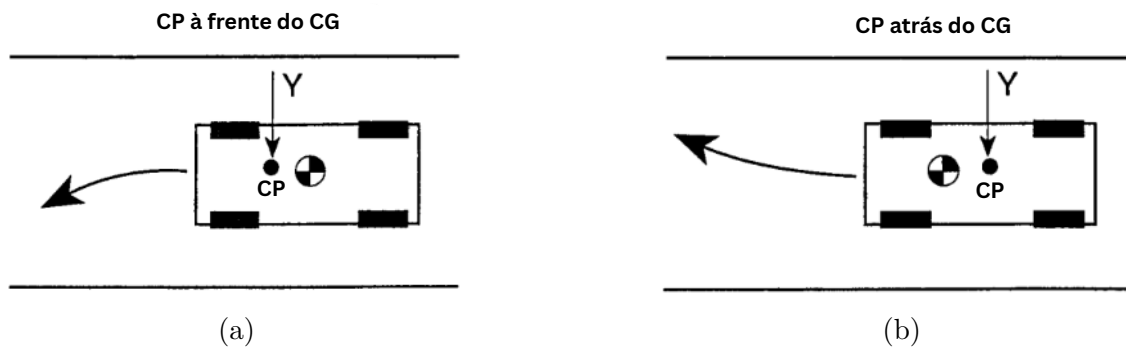


Figura 11 – Influência da posição do CP em relação ao CG no comportamento dinâmico do veículo. Adaptado de (KATZ, 2016).

2.4 Túnel de vento e balança de forças

Embora a aerodinâmica seja apenas um dos muitos aspectos do desenvolvimento, ela é uma das poucas que é requerida ao longo de toda a vida do projeto. Simulações computacionais e testes em estrada têm um papel importante nos programas modernos de design aerodinâmico de carros, mas as medições em túnel de vento continuam sendo o método mais comum e extensivamente utilizado (BARLOW; RAE; POPE, 2015). Nesta seção será abordado o referencial teórico acerca do método experimental.

2.4.1 Túnel de vento

O objetivo geral da maioria dos túneis de vento é obter, na seção de testes, um escoamento o mais próximo possível de um escoamento paralelo, uniforme e estacionário, com velocidade constante ao longo de toda a seção. A perfeição, porém, não é alcançável, de modo que todo projeto é limitado por restrições como custo máximo, espaço disponível, tempo disponível e conhecimento técnico disponível. Em geral, busca-se obter a maior seção de testes e a maior velocidade possível dentro do orçamento disponível. No entanto, alta velocidade e grande dimensão são exigências concorrentes (BARLOW; RAE; POPE, 2015).

Os túneis de vento podem ser classificados, quanto ao seu regime de operação, em circuitos abertos ou circuitos fechados, sendo cada configuração mais adequada a determinados tipos de aplicação.

O túnel de vento de circuito aberto (Fig. 12) é caracterizado pela captação do ar diretamente do ambiente externo, o qual é acelerado por um ventilador, conduzido pela seção de testes e, em seguida, devolvido ao meio ambiente. Essa configuração apresenta uma estrutura mais simples e um custo de construção reduzido, sendo amplamente empregada em instituições de ensino, em experimentos com modelos de pequena escala e em estudos realizados em regimes de baixa velocidade. No entanto, túneis desse tipo são mais suscetíveis a perturbações externas, como variações nas condições ambientais de temperatura e pressão, além de apresentarem níveis de ruído mais elevados (BARLOW; RAE; POPE, 2015).

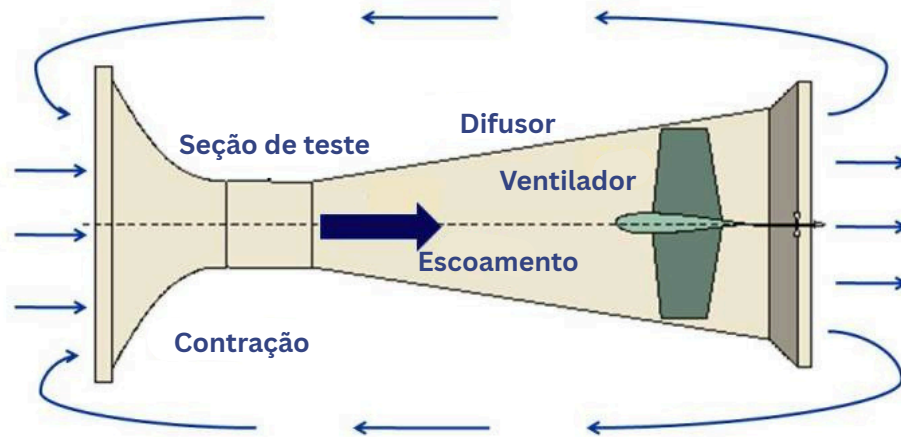


Figura 12 – Representação de um túnel de vento de circuito aberto. Adaptado de (NASA, 2022b).

No túnel de vento de circuito fechado (Fig. 13), o ar circula em um trajeto contínuo e confinado, sendo recirculado após passar pela seção de testes por meio de dutos que o conduzem novamente ao ventilador. Essa configuração proporciona maior eficiência energética, uma vez que parte da energia do escoamento é conservada a cada ciclo, além de garantir melhor estabilidade térmica e controle mais preciso das condições do escoamento. Por essas razões, os túneis de circuito fechado são especialmente indicados para ensaios que demandam alta precisão e fidelidade nos resultados.

Entretanto, esse tipo de túnel exige um investimento inicial significativamente mais elevado, em virtude de sua maior complexidade construtiva e da necessidade de um espaço físico ampliado para acomodação de todo o circuito (BARLOW; RAE; POPE, 2015).

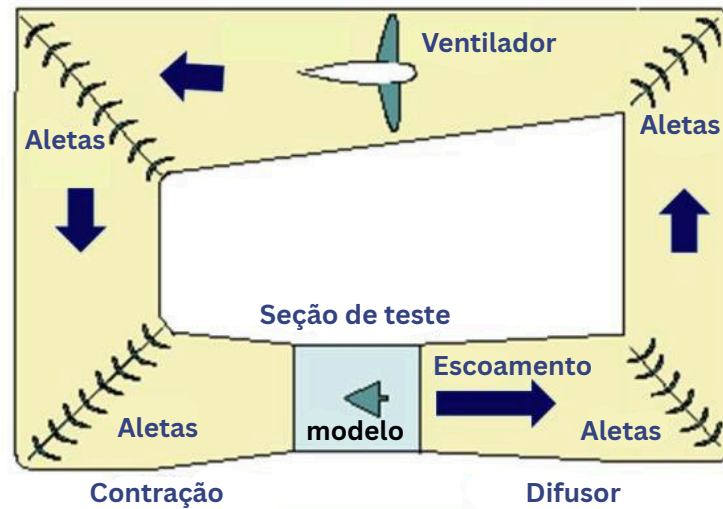


Figura 13 – Representação de um túnel de vento de circuito fechado. Adaptado de (NASA, 2022a).

A escolha entre túneis de vento de circuito aberto e de circuito fechado deve ser pautada pelas exigências técnicas de cada experimento. Os túneis de circuito aberto destacam-se pela maior acessibilidade e simplicidade construtiva, sendo adequados para aplicações didáticas, estudos exploratórios e etapas iniciais de projeto. Por outro lado, os túneis de circuito fechado são preferencialmente utilizados em centros de pesquisa avançada e nas indústrias aeronáutica e automobilística de alto desempenho, contextos nos quais a precisão, a estabilidade e a repetibilidade dos resultados experimentais são requisitos essenciais (BARLOW; RAE; POPE, 2015).

2.4.2 Balança de forças

As balanças de forças podem ser classificadas em internas e externas. Nas balanças internas, todos os sensores e conexões eletrônicas são montados dentro do modelo de teste, sendo conectados a uma plataforma de processamento de dados fora do túnel de vento. Essas balanças costumam ter custo menor, mas são projetadas para casos específicos, apresentando uma faixa de operação limitada. Por outro lado, as balanças externas são equipamentos maiores e mais caros, com sensores montados em uma estrutura externa ao túnel de vento, permitindo operar em uma gama mais ampla de condições e sendo ideais para aplicações educacionais (BARLOW; RAE; POPE, 2015).

Dentre os principais tipos de balanças externas empregadas em túneis de vento, destacam-se as configurações piramidal, coaxial, emparelhada e tipo plataforma. A balança piramidal permite a medição direta das seis componentes da carga aerodinâmica

por meio de suportes inclinados que convergem no ponto de resolução do momento. A balança coaxial, indicada para túneis com espaço restrito ao redor da seção de testes, apresenta desafios na escolha de sensores devido à necessidade de detectar pequenas cargas a partir de forças elevadas. A configuração emparelhada, com duas balanças laterais conectadas por uma estrutura rígida, permite o alinhamento com o centro de momento do modelo, eliminando a necessidade de correções posteriores (HUFNAGEL, 2022). Já a balança tipo plataforma destaca-se pela simplicidade de construção e montagem, com sensores instalados sob uma superfície plana (SOARES; NETO; SILVA, 2019; BUENO, 2018).

A forma mais direta de testar veículos em túneis de vento consiste na disposição das rodas sobre o piso da seção de testes, conforme ilustrado na Fig.14. Nessa configuração, as rodas são posicionadas sobre hastes, mecanicamente desacopladas do piso do túnel e conectadas a uma balança de seis componentes. Esse arranjo, amplamente adotado em instalações em escala real, está representado na Fig.15. As quatro hastes circulares são sustentadas por suportes individuais, os quais estão diretamente acoplados ao sistema de medição de cargas aerodinâmicas (KATZ, 2016).

Para assegurar que apenas as forças resultantes do escoamento sejam registradas, o sistema de medição é isolado estruturalmente do piso do túnel. Essa separação é obtida por meio de duas mesas giratórias excêntricas adicionais, alinhadas ao nível do piso e capazes de girar uma em relação à outra, conforme ilustrado na Fig. 15. Tais mesas também podem ser transladas em relação à mesa giratória principal, garantindo uma folga mínima entre as placas que sustentam as rodas e o restante da superfície do túnel. Esse ajuste é realizado individualmente para cada modelo veicular testado. A mesa giratória principal permite a rotação do modelo em torno do eixo vertical, enquanto os suportes conectados à balança se movimentam de forma sincronizada, prevenindo o contato com o piso e, consequentemente, interferências na medição das forças (KATZ, 2016; HUFNAGEL, 2022).

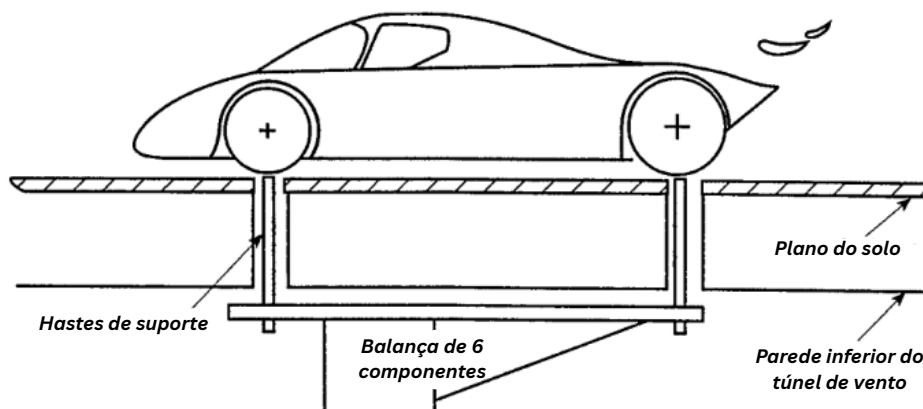


Figura 14 – Representação esquemática de uma balança plataforma de 6 componentes utilizada em ensaios aerodinâmicos. Adaptado de (KATZ, 2016)

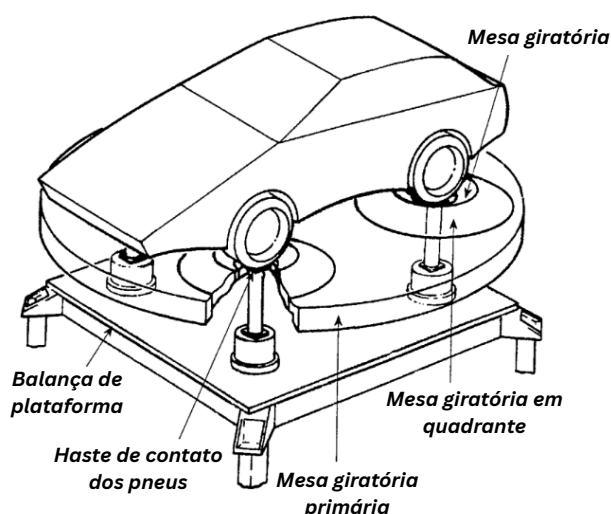


Figura 15 – Representação de uma balança plataforma utilizada em ensaios aerodinâmicos, com mesas giratórias para ajuste da orientação do modelo e hastes de contato para medição das cargas nos pneus. Adaptado de (KATZ, 2016)

Para considerar a rotação das rodas do veículo durante o ensaio, pode ser utilizados motores montados na balança. A velocidade desses motores é sincronizada com a velocidade do escoamento na seção de testes. Nessa configuração, o peso do modelo é sustentado por suportes instalados no interior das rodas. Essa técnica pode ser aplicada à maioria dos métodos de simulação de solo com movimento, sendo sua principal limitação a impossibilidade de uso em conjunto com sistemas de esteira móvel (KATZ, 2016).

Quando se emprega uma esteira móvel para simulação do solo, o modelo é geralmente sustentado por uma haste montada na parte traseira ou superior do veículo. Sob o ponto de vista aerodinâmico, a configuração com haste montada na traseira apresenta

menor interferência em comparação àquela montada no teto. As forças e momentos aerodinâmicos são medidos por uma balança de seis componentes, instalada entre o corpo do modelo e a haste de sustentação. Trata-se de um dispositivo de medição de elevada sofisticação. Por meio do corte de orifícios e formatos específicos na estrutura metálica da balança, sua geometria é projetada para ser sensível, em pontos estratégicos, a diferentes cargas, como o arrasto. Uma vez identificados esses pontos sensíveis, extensômetros são aplicados para a obtenção das medições desejadas (KATZ, 2016).

2.5 Regulamento da FSAE

Anualmente, a Formula SAE publica uma nova versão do regulamento técnico da competição, que define os parâmetros de projeto e as restrições de engenharia aplicáveis aos veículos participantes. Para o desenvolvimento deste trabalho, foi adotada como referência a edição *FSAE Rules 2025* (SAE International, 2025).

A Seção T.7 do regulamento da Formula SAE 2025 estabelece diretrizes voltadas à segurança, padronização e controle do desempenho aerodinâmico dos protótipos. Essas normas definem as dimensões máximas dos dispositivos aerodinâmicos, as exigências geométricas mínimas das bordas e superfícies expostas, além do posicionamento permitido em relação aos eixos, pneus e à estrutura do veículo.

Conforme ilustrado na Figura 16, o regulamento delimita zonas específicas para a instalação dos dispositivos aerodinâmicos, determinando seus limites de altura, comprimento e largura. A altura máxima é de 1200 mm na região traseira, 500 mm fora dessa zona e 250 mm à frente do eixo dianteiro. Em planta, o comprimento não deve ultrapassar 700 mm à frente das rodas dianteiras nem 250 mm atrás das rodas traseiras.

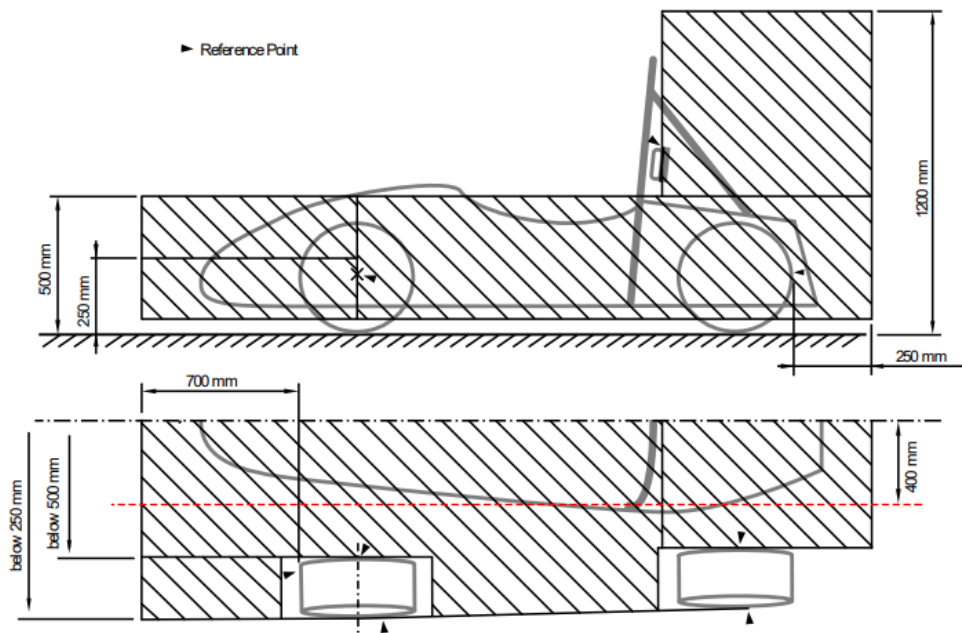


Figura 16 – Limitações geométricas para utilização de dispositivos aerodinâmicos. Adaptado de *FSAE Rules 2025*.

Além disso, o regulamento proíbe expressamente o uso de sistemas de efeito solo ativo, assegurando que toda a geração de força descendente ocorra de maneira passiva, exclusivamente pela interação entre o escoamento do ar e a geometria dos componentes.

No contexto deste estudo, tais restrições servem como base de projeto e de validação para os modelos desenvolvidos em simulação numérica (CFD) e ensaios experimentais em túnel de vento, garantindo que as configurações analisadas estejam em plena conformidade com o regulamento.

3 Modelagem Computacional

Este capítulo apresenta o desenvolvimento da geometria CAD e das análises numéricas (CFD), conforme o fluxograma ilustrado na Figura 17.

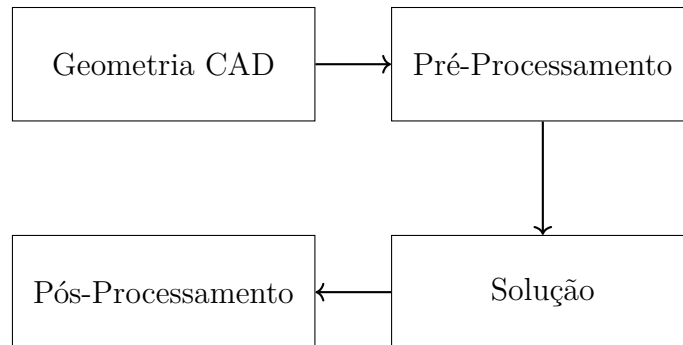


Figura 17 – Representação em formato de fluxograma do processo de simulação CFD

3.1 Desenvolvimento da Geometria CAD

Os dispositivos aerodinâmicos utilizados nas simulações CFD deste trabalho foram integralmente desenvolvidos pelo autor, com base no regulamento da competição Fórmula SAE 2025 e nas referências bibliográficas apresentadas no Capítulo 2. O projeto tridimensional do pacote aerodinâmico foi elaborado no software CATIA V5, tomando como base o quinto protótipo veicular da equipe Fórmula Gama Racing (FGR).

Todas as geometrias foram modeladas de forma parametrizada no CATIA, com o intuito de viabilizar futuras alterações e otimizações da configuração geométrica.

Previamente ao início do desenvolvimento, todos os sistemas do veículo foram removidos, exceto rodas, braços de suspensão, chassi e busto do piloto. A manutenção desses componentes se justifica por sua influência direta sobre o desempenho aerodinâmico do conjunto, sendo, portanto, essenciais para a realização das análises propostas.

3.1.1 Automação com Python e VBS

Para a modelagem das asas dianteira e traseira, foi desenvolvido pelo autor, scripts em Python e VBS com o objetivo de automatizar a geração de geometrias parametrizadas no ambiente CAD. Essa abordagem permitiu a rápida criação de asas com diferentes perfis aerodinâmicos, além da fácil variação de parâmetros como corda, envergadura, ângulo de ataque, torção, *gap*, *overhang* e número de elementos. Essa automatização viabilizou a análise e comparação eficiente de múltiplas configurações multielemento, otimizando

significativamente o processo de desenvolvimento aerodinâmico. Os QR codes apresentados na figura 18 direcionam para as animações da automação de modelagem das asas, mostrando o funcionamento dos scripts desenvolvidos em Python e VBS para geração paramétrica em CAD.



(a) Asa dianteira (Autor).



(b) Asa traseira (Autor).

Figura 18 – QR codes das animações da automação das asas dianteira e traseira

3.1.2 Sistemas do Veículo

Nesta subseção, são apresentados os sistemas essenciais do veículo que impactam no escoamento do ar, referidos como estrutura do veículo, embora não tenham como função primária a geração de desempenho aerodinâmico. Também fazem parte da estrutura do veículo, a carenagem frontal e os revestimentos laterais.

3.1.3 Estrutura do Veículo

Denomina-se estrutura do veículo o conjunto de elementos geométricos composto pelos braços de suspensão, chassi, piloto, rodas e pneus, os quais exercem influência significativa sobre o escoamento do ar ao redor do veículo, apesar de não terem como finalidade principal a geração de desempenho aerodinâmico.

3.1.4 Carenagem e revestimentos

A carenagem dianteira e o revestimento lateral foram desenvolvidos com foco na minimização do arrasto aerodinâmico e na suavização do escoamento ao longo da superfície externa do veículo.

3.1.5 Pacote Aerodinâmico

O pacote aerodinâmico é constituído pelos dispositivos projetados especificamente para gerar forças de sustentação negativa.

Assoalho, Difusor E *Flip Up*

O assoalho foi concebido com geometria simplificada, tendo como principal função gerar efeito solo. O difusor foi projetado com um ângulo de saída primário de 7° e um ângulo de saída secundário de 27° , visando otimizar a extração do escoamento e contribuir para a geração de força descendente.

Asa dianteira e asa traseira

A asa dianteira é composta por três perfis, todos utilizando o perfil de aerofólio S1223. Sendo que o segundo e terceiro elementos são torcidos. A asa também possui *endplates* para diminuir o arrasto induzido. Onde também incluem elementos de *Outwash* na extremidade de saída, direcionando o escoamento para longe das rodas, elementos de *Footplate* e elemento de *Upwash* no lado externo.

A asa traseira é composta por três elementos com perfil aerodinâmico S1223, adotando ângulos de ataque superiores aos utilizados na asa dianteira, com o objetivo de maximizar a geração de downforce. As *endplates* possuem louvres (aberturas) projetados para promover o alívio de pressão e melhorar a eficiência do escoamento na região.

O perfil S1223 (Selig S1223) foi selecionado com base em dados experimentais disponíveis na literatura ([SELIG et al., 1995](#)), em análises realizadas por meio do software XFOIL e em simulações numéricas (CFD) bidimensionais prévias. Dentre os perfis avaliados, o S1223 apresentou a maior relação entre sustentação e arrasto (L/D) em condições de baixo número de Reynolds, destacando-se como o mais eficiente aerodinamicamente para a faixa operacional do veículo em estudo.

3.1.6 Otimização da Geometria

Posteriormente, todas as geometrias do carro foram cuidadosamente simplificadas com o objetivo de otimizar o processo de geração de malha e reduzir o custo computacional das simulações CFD. Elementos irrelevantes para o escoamento, como parafusos, pequenos furos e componentes internos da unidade de potência e do sistema de transmissão, foram removidos. A geometria do chassi e da suspensão também passou por simplificações, preservando apenas os elementos com influência direta no comportamento aerodinâmico do veículo. Além disso, foram realizadas correções geométricas no modelo CAD para eliminar imperfeições, garantir a continuidade das superfícies e evitar problemas durante

a geração da malha, assegurando assim a integridade do modelo e a qualidade da malha gerada.

A Figura 19 apresenta os modelos finais em CAD do veículo com e sem o pacote aerodinâmico, já incorporando as otimizações mencionadas.

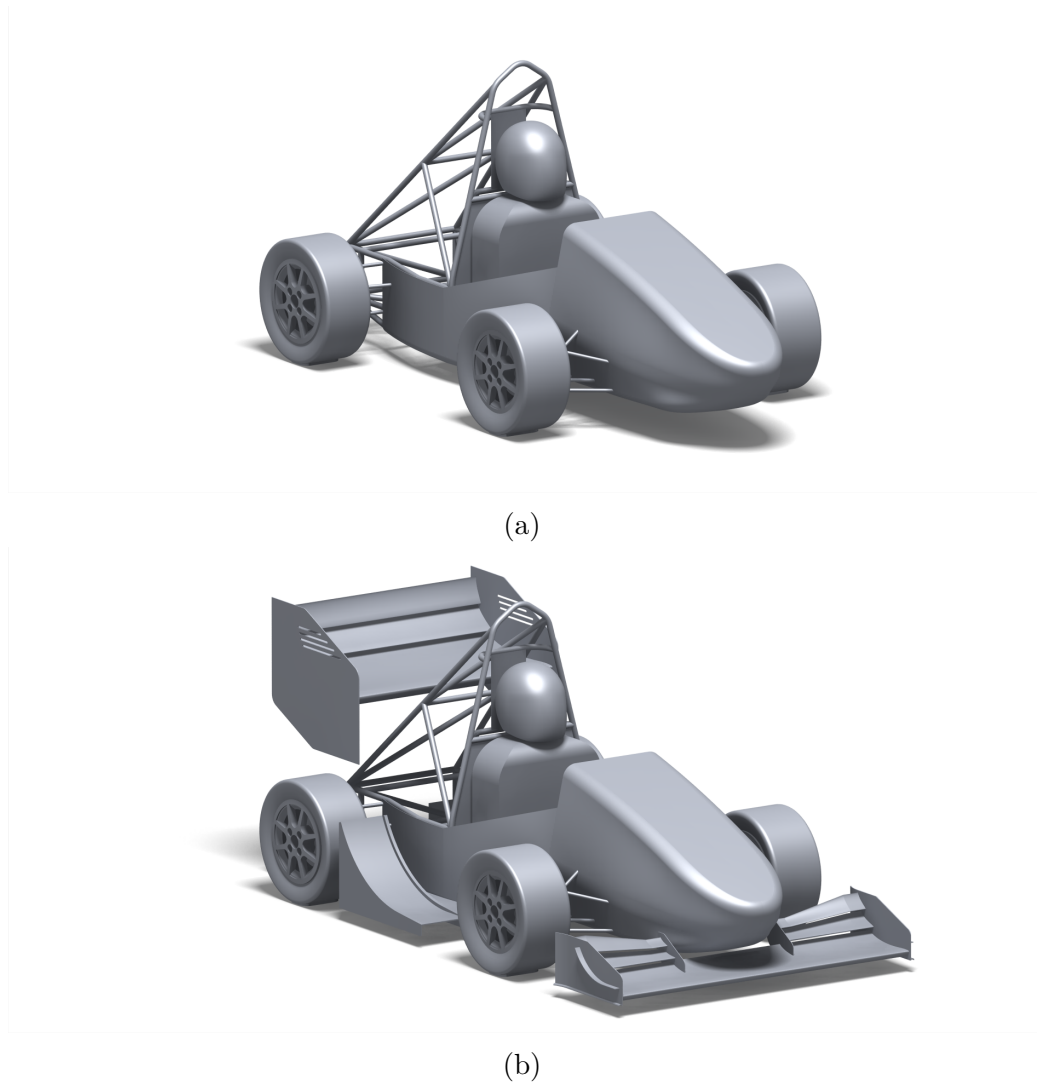


Figura 19 – (a) Veículo otimizado sem pacote aerodinâmico; (b) Veículo otimizado com pacote aerodinâmico. (Autor).

3.2 Pré Processamento

Nesta seção, são apresentados o processo de definição da malha computacional e as condições de contorno adotadas nas simulações, considerando o modelo do veículo em escala real. Buscou-se representar de forma mais fiel possível as condições físicas encontradas em pista, incluindo a simulação do movimento do solo e a rotação das rodas.

3.2.1 Definição do Domínio

No pré-processamento de CFD, o domínio do fluido é configurado como uma caixa retangular, com espaços adequados entre a entrada, o veículo e a saída para garantir condições de contorno corretas e evitar influência das paredes. A relação entre o tamanho do veículo e do túnel (fator de bloqueio) deve ser mantida baixa para evitar distúrbios no escoamento, como mostrado na figura.

Para economizar tempo computacional, utiliza-se a simetria do modelo, simulando apenas metade da geometria quando o escoamento também é simétrico.

As dimensões do domínio de simulação foram estabelecidas com base nas proporções características do veículo, de modo a garantir representatividade física adequada do escoamento. A largura e a altura do domínio foram definidas como 1,5 vezes o comprimento total do carro (L_x). O comprimento a montante foi fixado em 2 vezes esse valor, enquanto o comprimento a jusante correspondeu a 10 vezes o comprimento do veículo, como mostrado na figura 20.

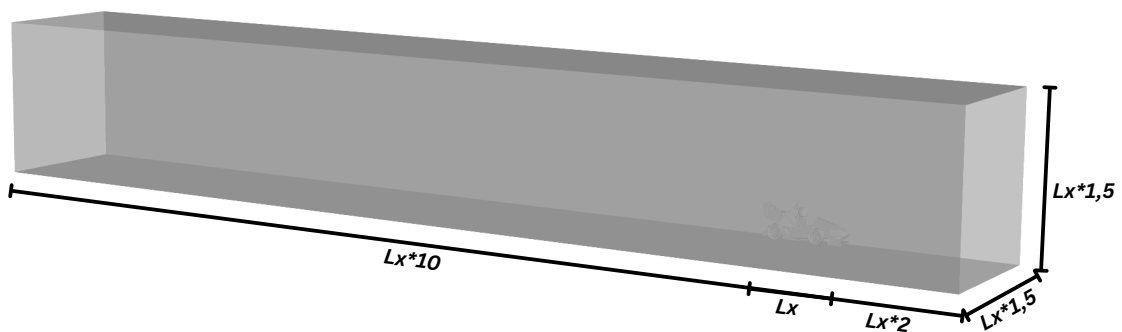


Figura 20 – Representação tridimensional do domínio de escoamento adotado, dimensionado em função do comprimento característico do veículo (L_x). (Autor).

3.2.2 Criação da malha

Em veículos da Fórmula SAE, a previsão precisa da distribuição de pressão estática sobre a superfície do carro é essencial, sobretudo nas regiões sujeitas ao descolamento do escoamento. Considerando que essas áreas críticas nem sempre são conhecidas com antecedência, é necessário aplicar refinamentos de malha em regiões de alta curvatura e próximas a superfícies sólidas, onde se desenvolve a camada limite. Além disso, zonas

afastadas da superfície do veículo, como a esteira gerada a jusante, também podem exigir refinamento em função dos gradientes significativos do escoamento.

A malha computacional foi gerada utilizando o software *ANSYS Fluent*, sendo sua qualidade avaliada com base em três critérios fundamentais. O primeiro, o parâmetro de distorção (*skewness*), avalia o desvio da célula em relação à forma ideal, sendo que valores próximos de zero indicam boa qualidade, enquanto valores superiores a 0,7 são considerados inadequados e valores acima de 1 tornam a célula inválida. O segundo critério, denominado envergadura (*warping*), aplica-se a elementos quadriláteros e avalia o desvio da planicidade entre os planos formados pelas faces; o *Fluent* recomenda que esse ângulo não ultrapasse 40°. Por fim, a qualidade ortogonal (*orthogonal quality*) quantifica o alinhamento entre as células e as normais das superfícies adjacentes, sendo que valores inferiores a 0,15 são considerados críticos e comprometem a precisão da simulação.

3.2.3 Tratamento da Camada

Para resolver adequadamente a camada limite em torno de um modelo, é necessário utilizar uma malha refinada próxima à superfície, cuja densidade depende do tipo de camada limite (laminar ou turbulenta), do modelo de função de parede adotado e, em casos de escoamento turbulento, do modelo de turbulência aplicado. Escoamentos turbulentos exigem uma malha ainda mais densa devido à forte interação entre o escoamento médio e a turbulência. A altura da primeira camada, foi calculada pela seguinte equação (ARABACI; DILBAZ, 2019):

$$y = \frac{\mu \cdot y^+}{\rho \cdot U_\tau} \quad (3.1)$$

Onde, μ é viscosidade dinâmica do fluido, y^+ é o valor adimensional desejado, ρ é massa específica do fluido e a U_τ velocidade de fricção.

A resolução da malha na região próxima às superfícies sólidas é geralmente avaliada por meio do parâmetro adimensional y^+ e do número de camadas prismáticas utilizadas para capturar adequadamente a camada limite.

O número y^+ representa a distância adimensional entre a parede e o centro do primeiro elemento da malha na direção normal à superfície. Esse parâmetro é fundamental para garantir a correta modelagem do escoamento viscoso próximo às superfícies, especialmente em simulações que utilizam modelos de turbulência baseados em leis da parede.

Neste trabalho, adotou-se inicialmente um valor de:

$$y^+ = 10$$

Esse valor é adequado para o uso de modelos de turbulência com função de parede, permitindo um bom equilíbrio entre precisão e custo computacional (ANSYS Inc., 2023).

As equações utilizadas para o cálculo da altura da camada (equação 3.1) são apresentadas a seguir, conforme descrito em (ARABACI; DILBAZ, 2019):

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_\infty}} \quad (3.2)$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} \cdot C_f \cdot \rho_\infty \cdot V_\infty^2 \quad (3.3)$$

$$C_f = 0.058 \cdot Re^{-0.2} \quad (3.4)$$

$$Re = \frac{\rho_\infty \cdot V_\infty \cdot L_x}{\mu} \quad (3.5)$$

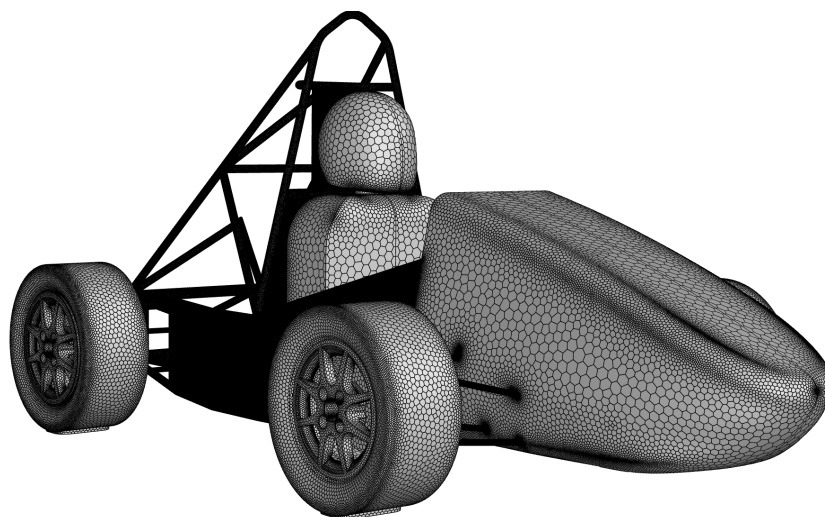
Onde, U_τ é a velocidade de fricção τ_w é tensão de cisalhamento na parede, C_f é o coeficiente de atrito e Re é o número de Reynolds.

A propagação da malha pode ser controlada pelo número de camadas ou por uma taxa de crescimento constante. Para garantir uma transição suave e uma previsão precisa da camada limite, utiliza-se a função *Wall Layers*, que gera camadas ao longo das superfícies fluido-parede antes da criação da malha volumétrica. Essa abordagem facilita a malhação de pequenos vãos e previne colisões de elementos. No modelo analisado, são usadas seis camadas, com taxa de crescimento de 1,2, permitindo uma variação gradual da altura dos elementos em toda a geometria.

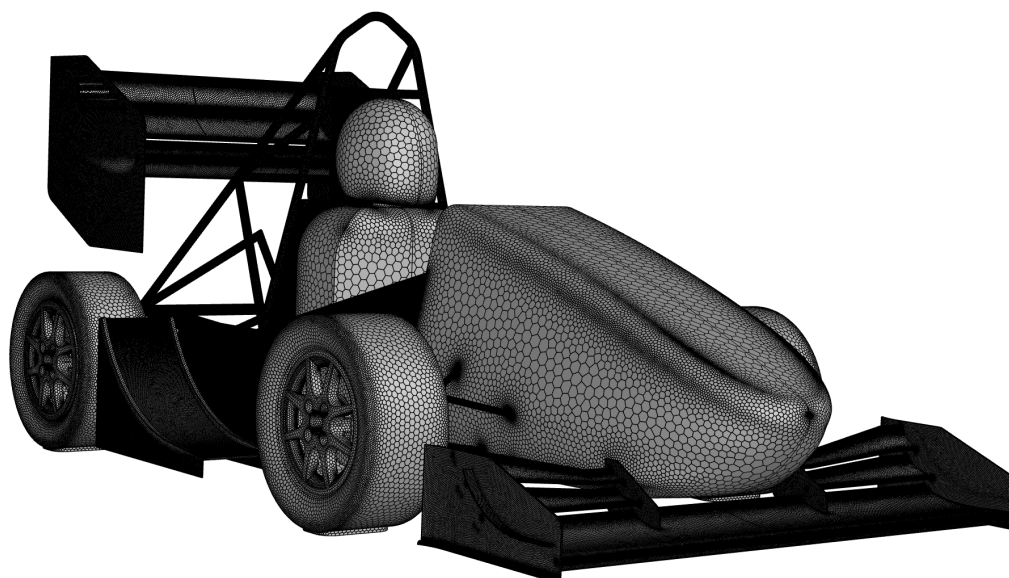
3.2.4 Malha de Volume

Para a malha volumétrica, optou-se pela utilização de uma malha poli-hexagonal, que geralmente gera um número menor de elementos e nós em comparação com a malha tetraédrica. Essa redução na contagem de elementos contribui para diminuir significativamente o tempo computacional.

A seguir, apresentam-se as representações das malhas geradas (Figuras 21 e 22), juntamente com os respectivos dados quantitativos sintetizados na Tabela 1.



(a)



(b)

Figura 21 – Representação dos modelos do veículo com malha superficial utilizada na simulação: (a) configuração sem pacote aerodinâmico; (b) configuração com pacote aerodinâmico completo. (Autor).

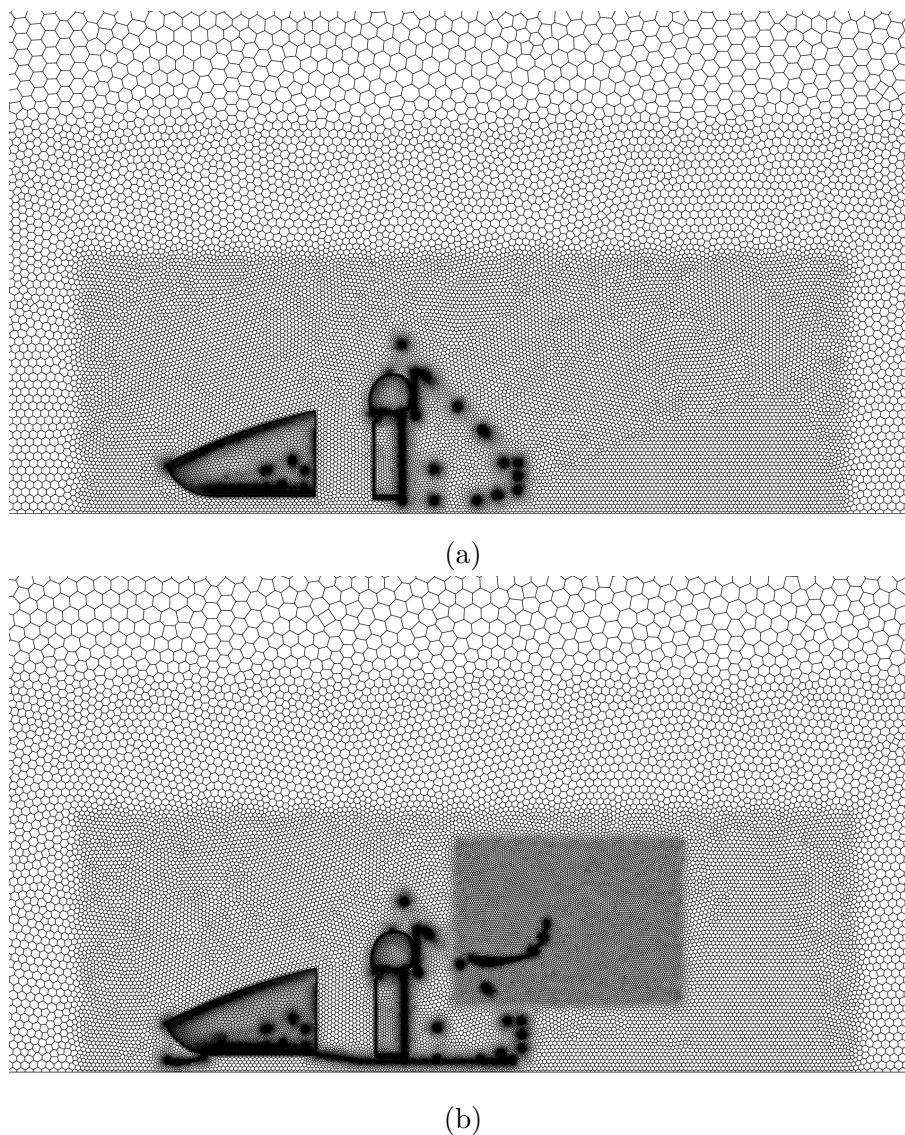


Figura 22 – Representação dos modelos do veículo com malha volumétrica utilizada na simulação: (a) configuração sem pacote aerodinâmico; (b) configuração com pacote aerodinâmico completo. (Autor).

Modelo	Nº de Nós	Nº de Elementos	Max. <i>Skewness</i>	Min. Qualidade <i>Ortogonal</i>
Com pacote	12.098.479	36.096.200	0.6	0.233
Sem Pacote	9.122.331	27.216.474	0.6	0.233

Tabela 1 – Comparação dos principais parâmetros das malhas geradas para os modelos com e sem pacote aerodinâmico, utilizando elementos do tipo *poly-hexcore*

A partir da Tabela 1, observa-se que não foram identificados problemas relacionados ao *warping* na malha gerada, o que indica uma adequada planicidade dos elementos e conformidade com os critérios de qualidade estabelecidos pelo *ANSYS Fluent*.

3.2.5 Condições de Contorno

Para as condições de contorno, considera-se o escoamento direcionado exclusivamente ao longo do eixo longitudinal (X) com velocidade de 60 Km/h (16,667 m/s), na área frontal de entrada do domínio.

Na região de saída do domínio, foi aplicada uma condição de pressão fixa de 0 Pa. O plano do chão recebeu uma condição de velocidade igual e no mesmo sentido do escoamento, simulando o movimento relativo do asfalto. Nas demais faces do domínio, foi aplicada a condição de *no-shear* (não cisalhamento), visando evitar interferências do escoamento provenientes dessas superfícies.

Para representar a rotação das rodas, aplicou-se uma condição de parede rotativa simples. Adicionalmente, volumes cilíndricos foram definidos ao redor das rodas, permitindo o uso da técnica de *Multiple Reference Frame* (MRF). Essa abordagem consiste em definir regiões de referência girantes dentro do domínio do escoamento, nas quais as equações de conservação são resolvidas em um referencial rotativo, simulando o movimento de rotação de forma estacionária.

Assim, os pneus foram modelados como parede rotativa, já que o interesse é apenas reproduzir o efeito tangencial do movimento relativo ao solo, e os aros das rodas (cavidade interna) foi modelado com MRF, pois há recirculação e rotação do fluido nessa região.

Neste estudo, o MRF é utilizado apenas para reproduzir as condições de contorno do veículo e dar realismo à simulação, sem aprofundar na modelagem numérica, que não é o foco deste trabalho.

A velocidade angular das rodas (ω_w) é determinada a partir do raio do pneu (r_w) e da velocidade do escoamento (V), conforme a relação:

$$\omega_w = \frac{V}{r_w}$$

Para as condições atmosféricas, foram adotados os parâmetros correspondentes ao ar padrão, mostrados na Tabela 2.

Pressão P [Pa]	Massa específica ρ [kg/m ³]	Viscosidade μ [Pa · s]
$1,01325 \times 10^5$	1,225	$1,7894 \times 10^{-5}$

Tabela 2 – Propriedades do ar Padrão

3.2.6 Modelo de Turbulência

Considerando que o número de Reynolds, baseado no comprimento característico do veículo, encontra-se na ordem de grandeza de 10^6 , é possível classificar o escoamento

como turbulento. Diante disso, faz-se necessária a utilização de um modelo de turbulência adequado, capaz de representar com precisão os efeitos associados à turbulência em escoamentos externos ao redor de veículos automotivos.

Para esta simulação, optou-se pela adoção do modelo $k-\omega$ GEKO (Generalized $k-\omega$), pertencente à classe de modelos *RANS* (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Tais modelos consistem na resolução das equações de Navier-Stokes médias de Reynolds, complementadas por equações de transporte adicionais que modelam os efeitos turbulentos.

O modelo $k-\omega$ é amplamente reconhecido por sua robustez e confiabilidade na simulação de escoamentos externos, especialmente em regiões próximas à parede e em situações onde ocorrem separações do escoamento. A versão GEKO foi escolhida por apresentar maior flexibilidade e capacidade de ajuste frente a diferentes condições de contorno e geometrias complexas, superando limitações presentes em modelos como o *SST* (*Shear Stress Transport*). (MENTER; LECHNER; MATYUSHENKO, 2021)

O modelo GEKO permite a parametrização de diversos coeficientes. Dentre eles, destaca-se o C_{sep} , o qual atua diretamente na previsão da separação do escoamento em superfícies lisas. Esse parâmetro influencia a viscosidade turbulenta (também chamada de *eddy viscosity*): valores mais elevados de C_{sep} reduzem a viscosidade turbulenta, aumentando a sensibilidade do modelo a gradientes de pressão adversos.

Neste trabalho, o valor adotado foi $C_{sep} = 1$, com base em estudos anteriores da literatura especializada, os quais indicam que esse valor proporciona uma estimativa mais precisa das forças aerodinâmicas em simulações de veículos terrestres (MENTER; LECHNER; MATYUSHENKO, 2021). A faixa típica recomendada para este parâmetro varia entre 0,7 e 2,5.

3.2.7 Estratégia de Inicialização e Convergência

Para a resolução das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, foi utilizada a plataforma *ANSYS Fluent*, adotando-se configurações baseadas na robustez e precisão requeridas para o escoamento em questão. As decisões metodológicas são detalhadas a seguir.

Foi utilizado o método de solução acoplado, no qual as equações de continuidade e momento são resolvidas simultaneamente. Esse esquema é especialmente indicado para casos que envolvem geometrias complexas e altos gradientes de pressão, devido à sua maior robustez e rapidez de convergência. Embora requeira maior uso de memória RAM, esse método melhora a estabilidade numérica em relação aos esquemas segregados (FERZIGER; PERIĆ, 2002).

Adotou-se discretização espacial de segunda ordem, com o cálculo dos gradientes baseado no método dos mínimos quadrados (*Least Squares Cell Based*). Este tipo de

interpolação oferece maior precisão, sendo adequado para malhas refinadas e casos onde se deseja capturar com fidelidade os gradientes de pressão, velocidade e temperatura. No entanto, sua aplicação pode introduzir oscilações numéricas caso a malha não possua qualidade adequada (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007b).

Foi aplicada a técnica de *Warped-Face Gradient Correction*, a qual visa melhorar a acurácia do cálculo dos gradientes em malhas não estruturadas ou com distorções nas faces das células. Essa técnica compensa erros induzidos pela má qualidade geométrica da malha, resultando em soluções mais confiáveis (ANSYS Inc., 2023).

Utilizou-se o método de pseudo-tempo (*Pseudo-Time Method*) para acelerar a convergência em simulações estacionárias. Esse método introduz um termo artificial de tempo nas equações de Navier-Stokes, convertendo o problema estacionário em pseudo-transiente. Tal abordagem é compatível com formulários baseados em densidade, permitindo o uso de técnicas de integração temporal para melhorar a eficiência computacional sem alterar o resultado final (BLAZEK, 2015).

Foi considerada, quando necessário, a técnica de relaxação de termos de alta ordem (*High Order Term Relaxation*). Esta ferramenta ajusta a influência dos termos de ordem superior nas equações governantes, contribuindo para a estabilidade e eficiência de simulações que envolvem física não linear e dificuldades de convergência (ANSYS Inc., 2023).

A condição inicial do escoamento foi definida com base no método de *Hybrid Initialization*, utilizando o referencial absoluto (*Absolute Reference Frame*), apropriado para simulações que envolvem zonas rotativas modeladas por *Multiple Reference Frame* (MRF). A inicialização híbrida fornece um campo inicial consistente com o domínio, facilitando a convergência das equações governantes.

Os controles de pseudo-tempo e os fatores de relaxação foram mantidos em seus valores padrão, conforme recomendação do *Fluent*, por apresentarem bom desempenho na maioria das situações com malhas de qualidade satisfatória. Estes parâmetros controlam a taxa de atualização das variáveis por iteração e influenciam diretamente a estabilidade e a taxa de convergência do problema.

3.3 Resultados

A diferença de taxa mássica entre a entrada e a saída do domínio computacional foi de $1,65 \times 10^{-4}$ kg/s para a simulação com o pacote aerodinâmico, e de $4,71 \times 10^{-5}$ kg/s na configuração sem o referido pacote. Esses valores próximos de zero indicam conservação da massa, sugerindo que o escoamento que entra no domínio é equivalente ao que sai, o que corrobora a consistência da simulação.

A resolução efetiva da malha foi avaliada a partir dos valores de y^+ obtidos na simulação. Na simulação do modelo com o pacote aerodinâmico, o y^+ obtido foi de $8,04 \times 10^{-3}$, enquanto na simulação sem o pacote, o valor foi de $2,82 \times 10^{-2}$. Esses valores indicam que a malha resultante é mais refinada do que o previsto, situando-se dentro da subcamada viscosa e, portanto, capaz de resolver integralmente a camada limite sem recorrer a funções de parede. Tal resultado reforça a qualidade da discretização adotada e a confiabilidade das soluções numéricas obtidas.

Além disso, observou-se a convergência satisfatória dos resíduos das equações governantes, bem como dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L). Esses resultados indicam estabilidade numérica e confiabilidade das soluções obtidas.

A Tabela 3 apresenta a área de referência projetada (A) e os principais parâmetros globais obtidos a partir das simulações, tais como os coeficientes de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L), além da razão entre sustentação e arrasto (C_L/C_D).

Modelo	A [m ²]	CD	CL	CL/CD	Tempo de volta [s]
Com pacote	1,19	1,21	-2,41	-1,99	74,58
Sem Pacote	0,92	0,949	0,327	0,344	76,32

Tabela 3 – Comparação dos parâmetros aerodinâmicos e desempenho entre os modelos com e sem pacote aerodinâmico.

Adicionalmente, foi utilizado o software *OptimumLap* para estimar o tempo de volta no traçado da prova de resistência da competição Fórmula SAE. Trata-se de uma ferramenta de simulação de desempenho veicular baseada em modelo de ponto massa, que permite prever o comportamento dinâmico do veículo ao longo do percurso. Para esta análise, utilizou-se como base o modelo do carro da equipe FGR, incorporando os dados aerodinâmicos obtidos nas simulações CFD. Pode-se observar esse tempo na tabela 3 e na imagem 23.

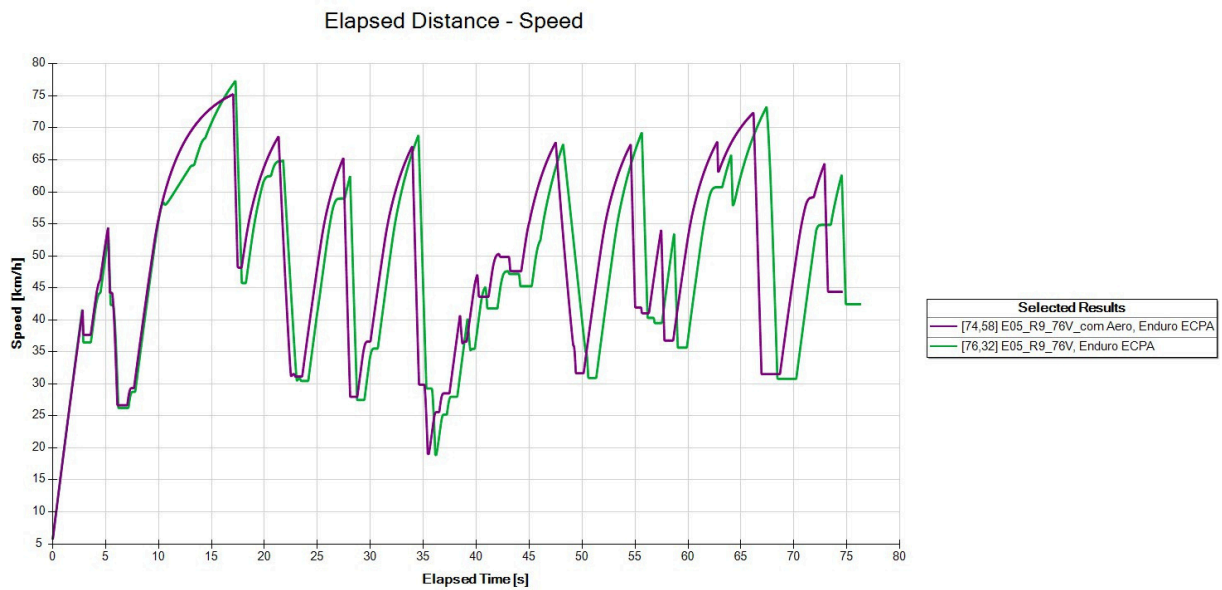


Figura 23 – Variação da velocidade em função do tempo, comparando o desempenho do veículo Fórmula SAE com e sem pacote aerodinâmico. (Autor)

A figura 23 apresenta a variação da velocidade em função do tempo, comparando o veículo Fórmula SAE com pacote aerodinâmico (linha roxa) e sem pacote aerodinâmico (linha verde). Observa-se que, apesar de o carro com aerodinâmica (linha roxa) atingir picos de velocidade levemente inferiores em alguns trechos, ele apresenta retomadas mais rápidas e maior estabilidade nas acelerações. Isso indica que o pacote aerodinâmico melhora a aderência do veículo, em curvas.

Complementarmente, a Tabela 4 detalha a contribuição de diferentes componentes do veículo para os valores totais de arrasto (D) e força vertical (L), possibilitando uma análise mais aprofundada da distribuição das cargas aerodinâmicas. Essa decomposição por parte do veículo permite identificar quais elementos são mais eficazes na geração de sustentação negativa (*downforce*) e quais apresentam maior contribuição ao arrasto.

Modelo	Parte	D	L
Com Pacote	Carro	24,69 Kg	-49,72 Kg
	Carenagem Frontal	11,61%	-0,57%
	Difusor e Assoalho	7,45%	13,07%
	Asa Dianteira	11,73%	51,93%
	Asa Traseira	34,43%	39,79%
Sem Pacote	Carro	11,55 Kg	2,89 Kg
	Carenagem Frontal	15,67%	-13,85%

Tabela 4 – Forças de arrasto (D) e Sustentação (L) totais por cada componente dos modelos com e sem pacote aerodinâmico.

No caso do modelo com pacote aerodinâmico, observa-se na tabela 4 que o veículo gera 24,69 kg de arrasto e $-49,72$ kg de força vertical, sendo esta última uma sustentação negativa (*downforce*). Entre os componentes, as asas dianteira e traseira são as principais responsáveis pela geração de *downforce*, representando juntas mais de 90% da contribuição para a força vertical total. O difusor e o assoalho também apresentam contribuição significativa, correspondendo a 13,07% do valor de L . Para o modelo sem pacote aerodinâmico, o arrasto total é reduzido para 11,55 kg, enquanto a força vertical assume valor positivo de 2,89 kg, indicando a presença de uma leve sustentação ascendente. Nesse caso, a carenagem frontal é o componente que mais contribui tanto para o arrasto quanto para a sustentação positiva, conforme indicado pelas porcentagens associadas.

A Figura 24 apresenta os campos de velocidade e pressão estática obtidos por meio das simulações CFD. No plano de simetria do veículo é exibido o contorno de velocidade, enquanto sobre a superfície da carroceria visualiza-se o contorno de pressão.

Observa-se claramente a influência dos dispositivos aerodinâmicos na modificação do escoamento ao redor do veículo. Na configuração com o pacote aerodinâmico (b), nota-se uma intensificação das regiões de baixa pressão sobre as asas e o difusor, o que contribui significativamente para o aumento da força de sustentação negativa (*downforce*). Adicionalmente, percebe-se uma reorganização das linhas de corrente e uma maior expansão do escoamento na região posterior, indicando uma extração mais eficiente de energia da corrente de ar pelo conjunto de asas.

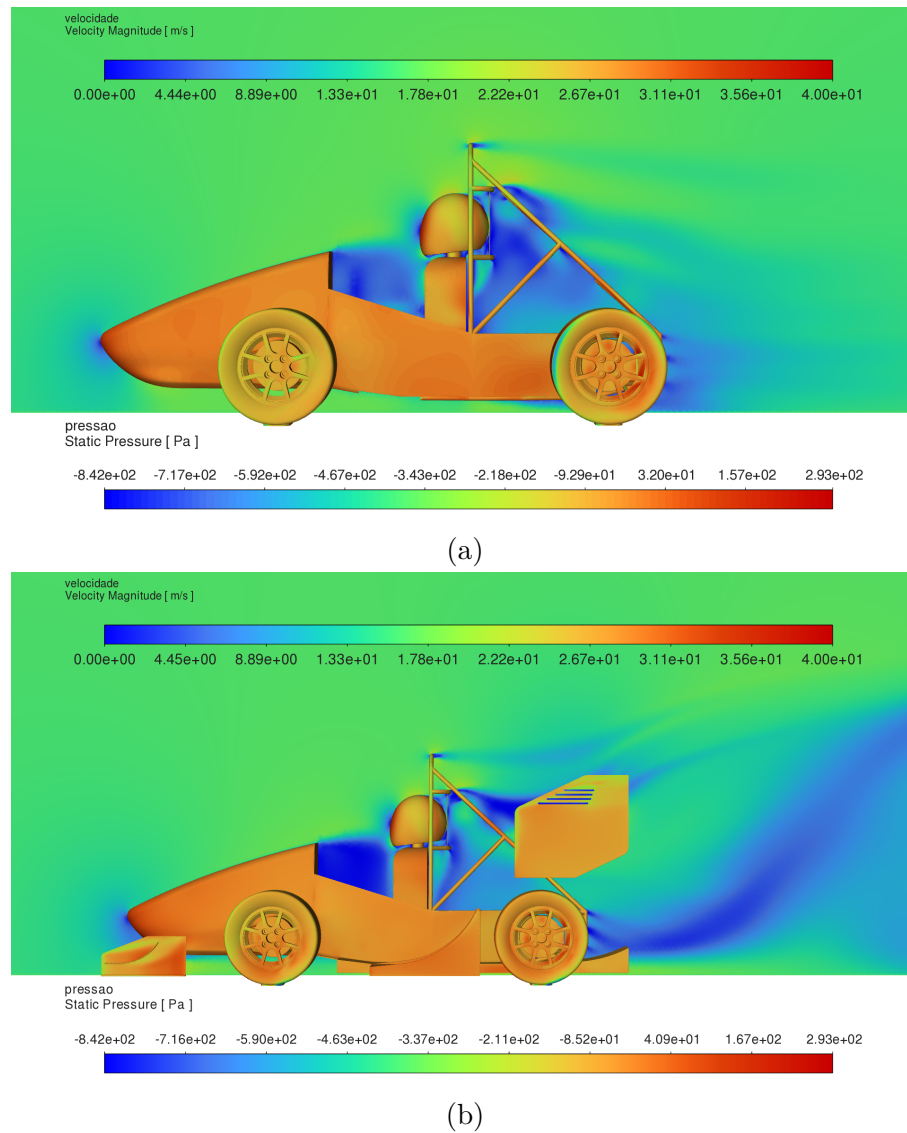


Figura 24 – Distribuição dos campos de velocidade e pressão estática: (a) sem pacote aerodinâmico; (b) com pacote aerodinâmico. (Autor).

A Figura 25 apresenta a visualização das linhas de corrente na vista traseira do modelo, coloridas de acordo com a magnitude da velocidade. Na configuração sem o pacote aerodinâmico (a), observa-se um escoamento relativamente simétrico e menos energético na esteira, com estruturas de vórtices menos pronunciadas.

Em contraste, na configuração com o pacote aerodinâmico (b), os dispositivos como asas dianteira e traseira e o difusor induzem a formação de vórtices mais intensos e bem definidos, promovendo maior controle do escoamento e extração de energia. Tais características são indicativas de uma maior geração de força descendente e também de aumento do arrasto induzido, o que está em consonância com os dados apresentados anteriormente.

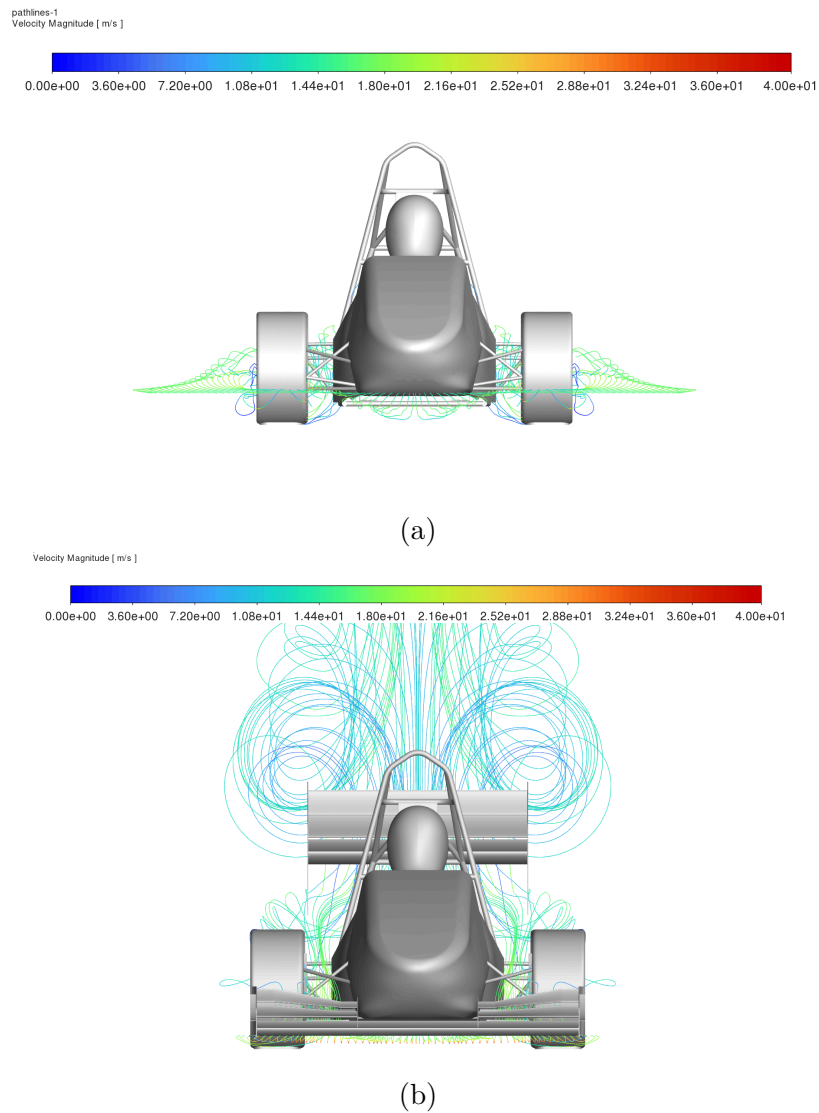


Figura 25 – Visualização das linhas de corrente pela magnitude da velocidade: (a) sem pacote aerodinâmico; (b) com pacote aerodinâmico. (Autor).

3.3.1 Convergência da malha

A Figura 26 apresenta o estudo de independência de malha, no qual foram analisadas diferentes quantidades de nós para os modelos com e sem pacote aerodinâmico. Os coeficientes aerodinâmicos de arrasto (C_D) e de sustentação (C_L) foram monitorados à medida que a malha era refinada.

Observa-se que, a partir de aproximadamente 12 milhões de nós, as variações nos valores de C_D e C_L tornam-se desprezíveis, indicando a obtenção de uma solução numericamente convergente. Tal comportamento demonstra que a discretização adotada apresenta resolução adequada para a captura dos fenômenos aerodinâmicos relevantes, garantindo a confiabilidade dos resultados obtidos nas simulações.

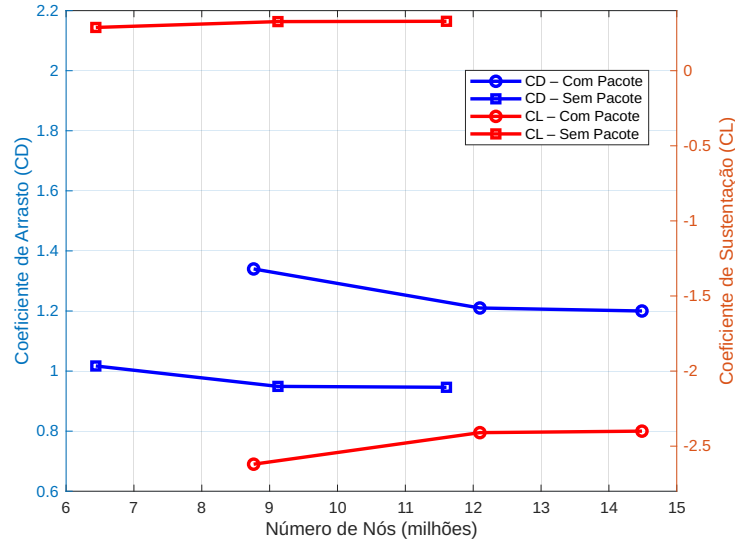


Figura 26 – Análise de sensibilidade a malha pela variação dos coeficientes de arrasto (C_D) e sustentação (C_L) em função do número de nós para os modelos com e sem pacote aerodinâmico (Autor).

A partir das análises realizadas neste capítulo, observou-se uma boa coerência numérica e física nos resultados obtidos, evidenciando a confiabilidade das simulações. Verificou-se, ainda, que o pacote aerodinâmico proposto se mostrou eficiente na redução do tempo de volta, uma vez que o aumento da aderência permite ao veículo frear mais tardiamente nas curvas e retomar a aceleração mais precocemente na saída.

Esse estudo numérico por meio de CFD fornecerá subsídios importantes para a continuidade do trabalho, especialmente para o desenvolvimento do capítulo posterior e para a etapa experimental a ser conduzida em túnel de vento.

3.3.2 Comparação com Veículos Conhecidos

A fim de avaliar os resultados obtidos nas simulações numéricas, realizou-se uma comparação com valores de coeficientes aerodinâmicos disponíveis (RACER, 2024). A Tabela 5 apresenta os coeficientes dos protótipos analisados (com e sem pacote aerodinâmico), bem como os coeficientes de automóveis de referência.

Tabela 5 – Comparação entre os coeficientes aerodinâmicos obtidos numericamente e dados de referência de veículos.

Carro	C_D	C_L	C_L/C_D
FGR E05 Com Aero	1,21	-2,41	-1,99
FGR E05 Sem Aero	0,95	0,33	0,34
Corvette C6	0,29	0,21	0,72
BMW E92 M3	0,33	0,08	0,24
Porsche 996 GT3 RS	0,30	-0,02	-0,07
Focus RS	0,36	-0,10	-0,28
Lotus Exige S1	0,43	-0,24	-0,56
Murciélago L670-4 SV	0,38	-0,29	-0,76
NASCAR (2002)	0,39	-0,46	-1,18
Mazda RX-792P (IMSA)	0,70	-3,80	-5,43

4 Considerações para validação Experimental

Para que os resultados obtidos por meio de simulações computacionais possam ser comparados com dados experimentais, é essencial que ambos os modelos numérico e experimental estejam submetidos às mesmas condições de contorno e atmosféricas.

4.1 Similaridade Aerodinâmica

Com base nos dados da atmosfera padrão ([U.S. Standard Atmosphere, 1976](#)) e considerando a altitude média da cidade de Brasília, local onde serão realizados os ensaios experimentais, determinam-se os seguintes parâmetros característicos do escoamento:

Pressão P [Pa]	Massa Específica ρ [kg/m ³]	Viscosidade μ [Pa · s]
8.80×10^4	1.09	1.77×10^{-5}

Tabela 6 – Propriedades do ar em Brasília com base na atmosfera padrão

Devido às limitações de espaço no túnel de vento, o veículo em escala real não pôde ser ensaiado diretamente, sendo necessário reduzir sua escala para garantir um fator de bloqueio adequado. Assim, foi realizado um *downscale* do modelo CAD original, reduzindo todas as dimensões lineares do veículo em um fator de 1/8, de modo a preservar as proporções geométricas e assegurar a semelhança física entre o modelo reduzido e o veículo em escala real.

O fator de bloqueio (B), indica o grau de interferência do modelo no escoamento dentro do túnel de vento. Esse fator é definido como a razão entre a área frontal do modelo do veículo (A_v) e a área da seção transversal do túnel de vento (A_t):

$$B = \frac{A_v}{A_t} \quad (4.1)$$

A literatura recomenda que esse fator seja inferior a 5% para evitar distorções significativas no escoamento ([BARLOW; RAE; POPE, 2015](#)). Neste estudo, a escala 1:8 adotada resultou em um fator de escala de:

$$B = 2.12\%$$

4.2 Considerações

Ao reduzir as dimensões do modelo para a escala 1 : 8, o número de Reynolds também é proporcionalmente alterado. O túnel de vento de circuito aberto disponível no LEA não permite o controle da viscosidade dinâmica nem da massa específica do fluido, de modo que não é possível igualar o número de Reynolds aos valores utilizados nas simulações numéricas em escala real.

Dessa forma, torna-se necessário realizar novas simulações numéricas com o número de Reynolds correspondente à escala reduzida, possibilitando uma comparação consistente entre os resultados computacionais e experimentais. A Tabela 7 apresenta a comparação entre os valores do número de Reynolds para o modelo em escala real e o modelo reduzido na razão 1 : 8.

Modelo	Re
Real	3,06E+06
Escala 1:8	3,83E+05

Tabela 7 – Comparação do número de Reynolds entre o modelo real e o modelo em escala reduzida

Para adaptar as simulações numéricas a essa nova condição, foram adotadas duas abordagens distintas. A primeira consiste em manter a geometria em escala real, ajustando os parâmetros da equação do número de Reynolds, neste caso, modificando-se a viscosidade dinâmica. A segunda abordagem consiste em realizar o redimensionamento da geometria e da malha computacional para a escala 1 : 8 (*downscale*), mantendo os demais parâmetros inalterados.

No presente estudo, ambas as estratégias foram adotadas. Para o método de ajuste do número de Reynolds por modificação da viscosidade, foi utilizada uma viscosidade dinâmica ajustada, de modo a obter um número de Reynolds equivalente ao da escala reduzida:

$$\mu_{\text{ajustada}} = 1.419 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

Outras simplificações também foram adotadas em relação às simulações numéricas anteriores, com o intuito de adaptar as condições de contorno às limitações impostas pela bancada experimental. Entre essas simplificações, destaca-se a não aplicação da condição de rotação das rodas (*Multiple Reference Frame* — MRF) e a consideração do solo como estacionário, ou seja, sem a implementação da condição de solo móvel (*moving ground*).

Tais ajustes visam alinhar as simulações às condições reais do experimento, permitindo uma comparação mais coerente entre os resultados numéricos e experimentais.

4.3 Novos Resultados

Dessa forma, novas simulações numéricas foram conduzidas utilizando o software *ANSYS Fluent*, agora com a aplicação das simplificações previamente mencionadas. Os resultados obtidos são apresentados nas tabelas a seguir, incluindo a comparação entre os dois métodos de adaptação: o uso da escala reduzida (1:8) e o ajuste da viscosidade, bem como a comparação entre o modelo com pacote aerodinâmico e aquele sem o referido pacote (Tabelas 8 e 9).

Observa-se que ambos os métodos, escala reduzida e ajuste de viscosidade, apresentaram resultados coerentes entre si, resultando exatamente nos mesmos coeficientes aerodinâmicos. Tal resultado era esperado, uma vez que o número de Reynolds foi mantido constante em ambas as abordagens.

Condição	L_x [m]	A [m ²]	CD	CL
Ajuste de viscosidade	2,9826	1,19	1,105	-1,65
Escala reduzida	0,372825	0,02	1,105	-1,65

Tabela 8 – Parâmetros aerodinâmicos e dimensões características do modelo com pacote aerodinâmico nas condições de ajuste de viscosidade e escala reduzida.

Condição	L_x [m]	A [m ²]	CD	CL
Ajuste de viscosidade	2,7593	0,92	0,738	0,237
Escala reduzida	0,3449125	0,01	0,738	0,237

Tabela 9 – Parâmetros aerodinâmicos e dimensões características do modelo sem pacote aerodinâmico nas condições de ajuste de viscosidade e escala reduzida.

A Tabela 10 apresenta o resultado da atualização dos principais coeficientes aerodinâmicos e das forças correspondentes obtidas para os modelos com e sem o pacote aerodinâmico de acordo com os ajustes mencionados anteriormente.

Modelo	CD	CL	CL/CD	D [Kg]	L [Kg]
Com Pacote	1,105	-1,65	-1,49	0,23	-0,38
Sem Pacote	0,738	0,237	0,32	0,16	0,05

Tabela 10 – Comparação dos coeficientes e forças aerodinâmicas para os modelos com e sem pacote aerodinâmico.

Com os valores devidamente ajustados, torna-se possível realizar uma comparação direta entre os resultados obtidos pelos métodos experimental e numérico.

5 Metodologia Experimental

Este capítulo descreve de forma detalhada a metodologia experimental empregada ao longo deste trabalho. Serão apresentadas as características do túnel de vento utilizado, o sistema de medição de forças, bem como as principais considerações e procedimentos experimentais adotados.

5.1 Túnel de vento

Os experimentos serão conduzidos em um túnel de vento de circuito aberto pertencente ao Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) da Universidade de Brasília (UnB), conforme ilustrado na Figura 27. A seção de testes do túnel apresenta dimensões aproximadas de $1,2\text{ m} \times 1,2\text{ m} \times 2\text{ m}$, sendo equipada com um bocal dotado de uma área de redução de 4:1. O escoamento é induzido por um ventilador axial, localizado na saída do túnel. O escoamento é gerado por um motor WEG W22, com potência de 10 HP, o qual aciona a sucção do ar por meio de um inversor de frequência CFW-09 Vectrue Inverter 10A 3CV (MENDES, 2020).

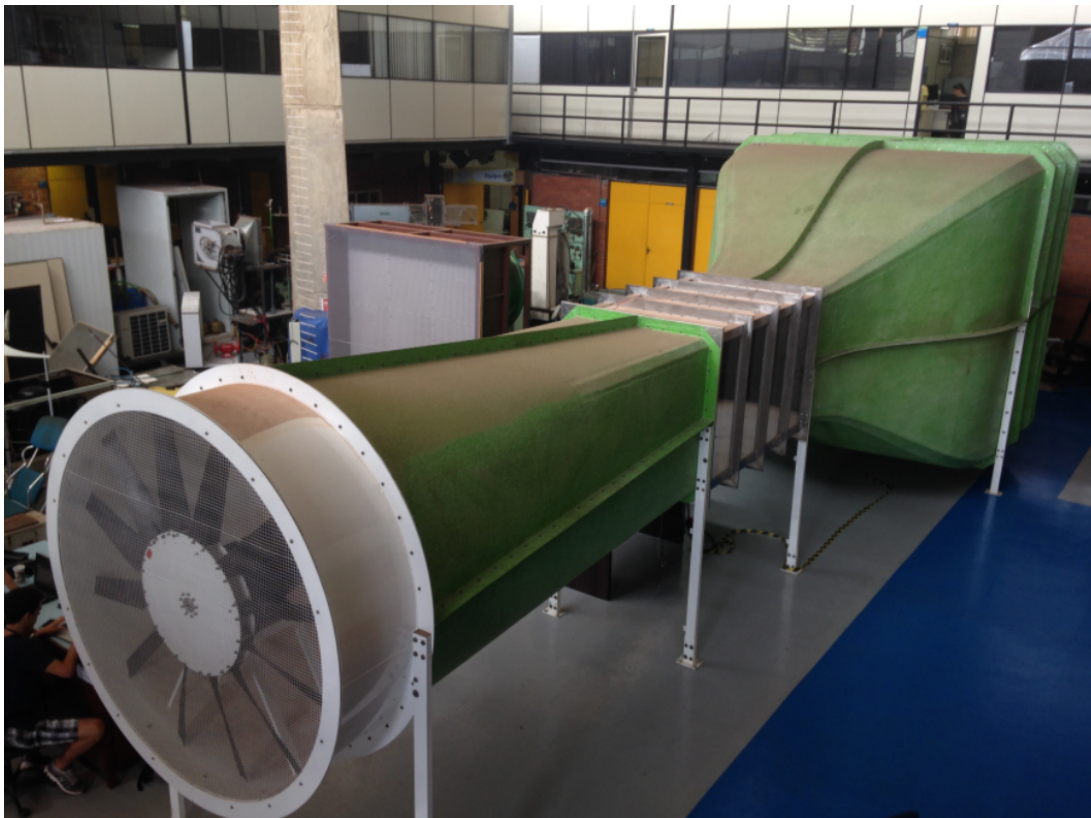


Figura 27 – Túnel de vento do LEA, UnB. (MENDES, 2020).

A velocidade do ventilador é comandada pelo inversor que é conectado a um sistema de controle de malha aberta. O sistema de controle é composto por um controlador lógico programável (CLP), um tubo de Pitot conectado a um manômetro diferencial (Figura 28) e um sensor de temperatura. O CLP é programado por um controlador PID de malha fechada, capaz de variar a velocidade do escoamento entre 0 e 20 m/s, com incerteza igual a $\pm 0,1$ m/s e intensidade de turbulência inferior a 1% (MENDES, 2020). A leitura do tubo de Pitot, registrada pelo manômetro diferencial em milímetros de coluna d'água (mmH₂O), é utilizada para a determinação da velocidade do escoamento no interior do túnel de vento.



(a) Tubo de Pitot



(b) Manômetro diferencial

Figura 28 – Sensores utilizados para medição da velocidade do escoamento no túnel de vento. (MENDES, 2020).

5.1.1 Determinação da velocidade do escoamento no túnel de vento

A determinação da velocidade do escoamento livre V_∞ baseia-se na medição da diferença de pressão entre a pressão total e a pressão estática captadas pelo tubo de Pitot. Essa diferença corresponde à pressão dinâmica do escoamento e é expressa por

$$\Delta P = P_{\text{total}} - P_{\text{estática}}. \quad (5.1)$$

Considerando o escoamento como incompressível, estacionário e sem variações significativas de altura, a equação de Bernoulli estabelece que a pressão dinâmica é dada por:

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2, \quad (5.2)$$

O manômetro diferencial fornece a leitura da altura de coluna de água deslocada, h , expressa em milímetros de coluna d'água (mmH₂O). Essa leitura corresponde à diferença de pressão hidrostática entre as duas colunas do manômetro:

$$\Delta P = \rho_w g h, \quad (5.3)$$

onde ρ_w é a massa específica da água.

Substituindo a Eq. (5.3) na Eq. (5.2), obtém-se:

$$\rho_w g h = \frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2. \quad (5.4)$$

Isolando a velocidade do escoamento livre:

$$V_\infty = \sqrt{\frac{2\rho_w g h}{\rho_\infty}}. \quad (5.5)$$

Adotando $\rho_\infty \approx 1,09 \text{ kg/m}^3$ para ar nas condições experimentais, $\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$ e $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, a Eq. (5.5) pode ser simplificada para uso direto com h em mmH₂O:

$$V_\infty \approx 4.243\sqrt{h}, \quad (5.6)$$

onde V_∞ é expresso em m/s. Essa expressão foi utilizada para converter as leituras manométricas em velocidade de escoamento no interior do túnel de vento.

5.2 Balança de forças

O objetivo da balança de forças neste estudo, é realizar a medição das forças aerodinâmicas de arrasto (D) e sustentação (L), bem como dos momentos de arfagem (p) e de rolagem (r). Adicionalmente, a balança precisa permitir o ajuste independente da altura de cada roda, possibilitando a modificação da atitude do modelo e a análise da influência dessas variações nas forças e momentos aerodinâmicos.

Considerando a complexidade associada à implementação de uma esteira e ao movimento rotacional das rodas, optou-se, neste trabalho, por adotar uma abordagem simplificada, mantendo o veículo e o solo em condição estática durante os ensaios. Também optou-se por não realizar a medição da força lateral e do momento de guinada, uma vez que o estudo concentra-se na avaliação do desempenho aerodinâmico longitudinal do veículo. Nessas condições, a contribuição das forças laterais e dos momentos associados é teoricamente desprezível, visto que não há incidência lateral do escoamento sobre o modelo.

Dessa forma, optou-se pelo desenvolvimento de uma balança de forças externa do tipo plataforma, com capacidade para medir quatro componentes: arrasto, sustentação em cada roda (por meio de hastes, conforme ilustrado na Figura 14), e os momentos de arfagem e rolagem em relação ao centro geométrico do modelo.

Para a realização das medições, desenvolveu-se uma configuração de bancada equipada com cinco sensores, sendo quatro sensores destinados à medição da sustentação e um sensor dedicado à medição do arrasto. O esquema completo da balança está representado

na Figura 29, na qual F_1 , F_2 , F_3 e F_4 correspondem aos sensores de sustentação, enquanto F_D representa o sensor de arrasto. Os parâmetros WB e TW indicam, respectivamente, o entre-eixos (distância entre os eixos dianteiro e traseiro) e a bitola (distância entre as rodas do mesmo eixo). Por fim, os momentos de arfagem (p) e de rolagem (r).

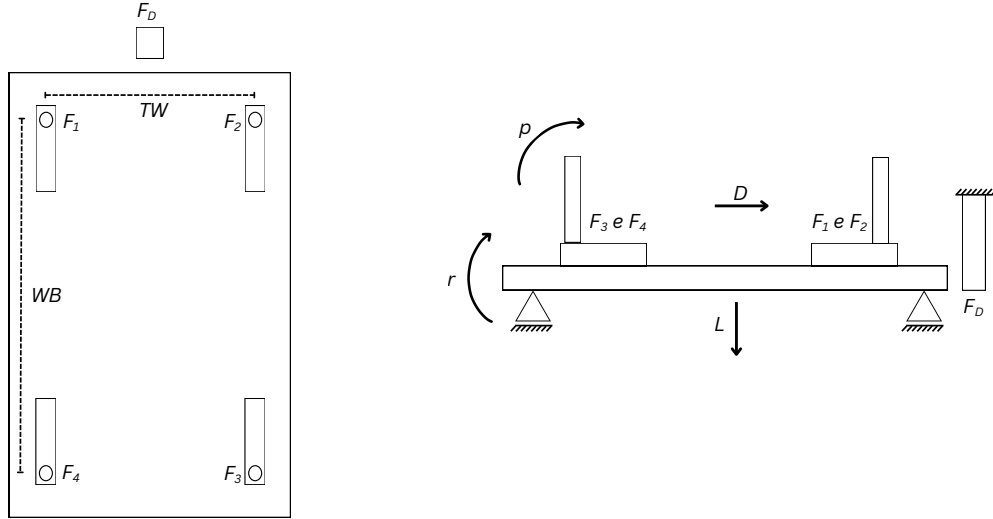


Figura 29 – Vista superior (esquerda) e vista lateral (direita) do posicionamento dos sensores na balança. Na Figura também são mostradas as força e momentos de interesse (Autor).

A partir da definição da posição dos sensores, pode-se modelar as equações, para a obtenção das forças e os momentos avaliados em relação ao centro geométrico do veículo, mostradas nas equações 5.7, 5.8, 5.9, 5.10.

$$L = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \quad (5.7)$$

$$D = F_D \quad (5.8)$$

$$p = \frac{WB}{2}(F_1 + F_2 - F_3 - F_4) \quad (5.9)$$

$$r = \frac{TW}{2}(F_2 + F_3 - F_1 - F_4) \quad (5.10)$$

5.2.1 Estrutura

A estrutura da balança foi projetada de forma a permitir a acomodação dos sensores e do modelo do veículo de maneira modular, possibilitando futuras alterações ou

adaptações conforme necessário. Para a construção da estrutura principal, foram utilizados perfis de alumínio extrudado do tipo v-slot, com seção transversal de 20×20 mm, amplamente empregados em montagens modulares devido à sua versatilidade e facilidade de fixação.

A montagem entre os perfis foi realizada utilizando cantoneiras metálicas, parafusos, arruelas e porcas tipo martelo, que se encaixam no vão interno do perfil, permitindo o ajuste preciso das conexões de forma rápida e eficiente.

A estrutura foi dividida em duas partes principais: estrutura fixa e estrutura móvel.

A estrutura fixa foi projetada para ser rigidamente acoplada aos flanges do túnel de vento do Laboratório de Energia e Ambiente (LEA), além de servir como suporte para o sensor de carga FD, responsável pela medição da força de arrasto.

A estrutura móvel foi desenvolvida para permitir o deslocamento livre no eixo longitudinal (direção do escoamento), viabilizando, assim, a medição do arrasto aerodinâmico do modelo. Esse deslocamento é garantido por meio de um sistema composto por quatro trilhos guias, nos quais deslizam roldanas em poliacetal com rolamento compatíveis com o perfil v-slot. Os trilhos são integrados à própria estrutura fixa, com duas roldanas posicionadas em cada lateral da estrutura móvel, permitindo a movimentação suave e controlada. Dessa forma, as estruturas fixa e móvel permanecem conectadas funcionalmente.

Para a fixação das células de carga, foram confeccionados calços em aço inoxidável, posicionados entre as células e os perfis de alumínio, com o objetivo de manter a extremidade sensível das células suspensa, permitindo que a deformação elástica ocorra livremente durante a aplicação das cargas. A fixação das células foram feitas também com porcas martelo e parafusos.

No caso específico da célula FD, responsável pela medição do arrasto, foi instalada uma pequena chapa de aço atuando como batente ao final do curso da parte móvel. Essa configuração assegura que, ao ser deslocada, a estrutura móvel acione diretamente o eixo sensível da célula de carga FD. Também nessa mesma chapa foi adicionado um parafuso olhal para fixar a corda de calibração do sensor FD.

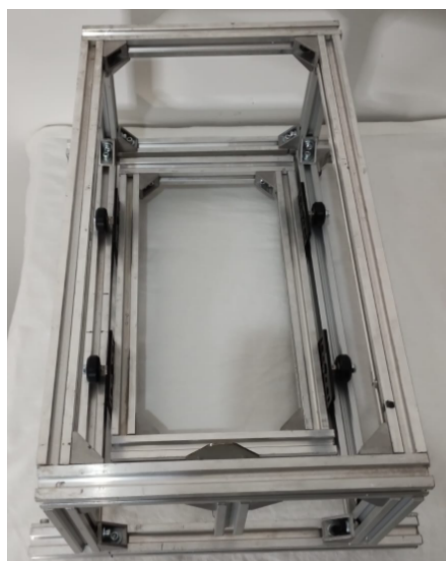
Para a sustentação do modelo, foram utilizadas quatro hastes de suporte confeccionadas a partir de tarugo de aço com diâmetro de $1/2$ pol. Cada haste foi equipada com uma luva de alumínio com diâmetro de $3/4$ pol., permitindo o ajuste independente da altura do modelo. O travamento dessas hastes foi obtido por meio de manípulos, que ao serem apertados aumentam o atrito entre os componentes, fixando rigidamente as posições desejadas (Fig. 30).



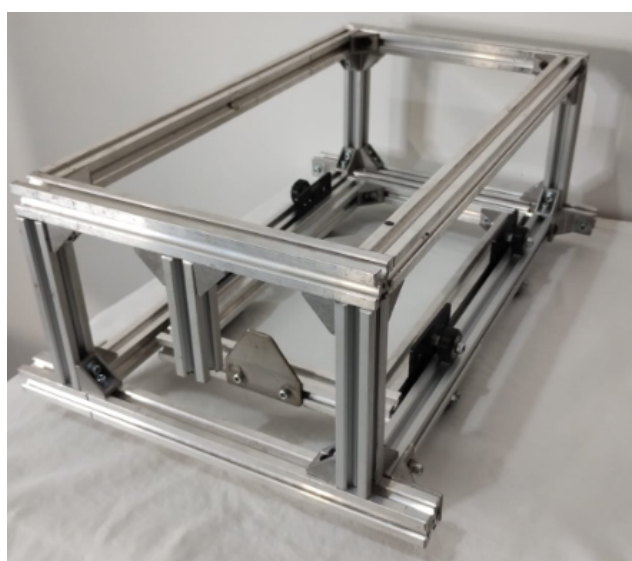
Figura 30 – Hastes de suporte (Autor).

Cada haste de aço foi usinada com rosca 3mm central em uma das faces, para ser fixada diretamente na célula de carga e na outra ponta sustentar a roda do protótipo. No centro do furo foi inserido um parafuso que conecta o conjunto da haste ao eixo da célula de carga. Para garantir a rigidez estrutural e assegurar que apenas a célula de carga sofra deformação elástica, foi inserida uma porca sextavada entre o parafuso central e a célula de carga. Este arranjo foi replicado nos quatro sensores dedicados à medição da sustentação aerodinâmica.

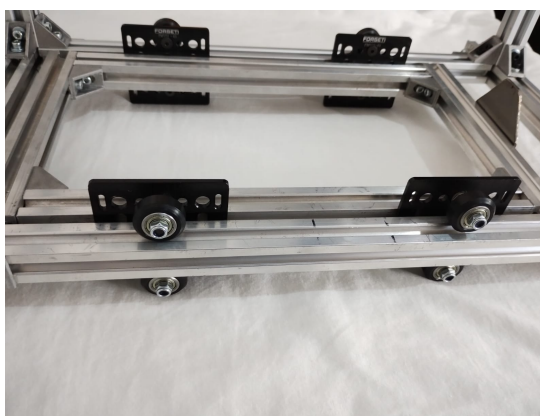
Abaixo (Fig. 31), pode ser observada o arranjo estrutural principal do conjunto de estrutura fixa e estrutura móvel.



(a)



(b)



(c)

Figura 31 – Estrutura principal da bancada (Autor).

Para fins de simplificação, o atrito gerado pelas roldanas será considerado desprezível.

5.2.2 Sensores e Instrumentação

A etapa subsequente no desenvolvimento da balança experimental consiste na seleção e integração dos sensores responsáveis pela medição das forças aerodinâmicas. Para essa finalidade, optou-se pela utilização de células de carga, amplamente empregadas em aplicações de medição de força e peso, devido à sua elevada precisão e estabilidade. Esses sensores convertem uma força mecânica aplicada em um sinal elétrico proporcional, permitindo sua posterior aquisição e análise por meio de sistemas eletrônicos de medição.

As células de carga mais comuns baseiam-se em extensômetros elétricos de resistência (*strain gauges*) colados a um corpo de prova, geralmente confeccionado em ligas metálicas com elevado limite elástico, como alumínio ou aço. Quando uma força é apli-

cada, o corpo elástico sofre uma microdeformação dentro do regime elástico, a qual é detectada pelos extensômetros. Essa deformação provoca uma variação proporcional na resistência elétrica dos sensores, que é então convertida em uma diferença de potencial elétrico mensurável.

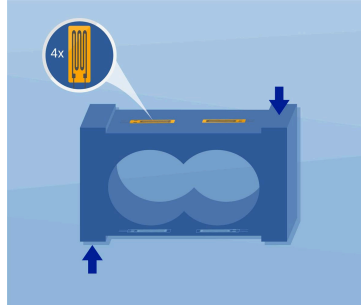


Figura 32 – Distribuição dos extensômetros em uma célula de carga do tipo *single point* (Autor).

Os extensômetros são geralmente dispostos em pares na parte superior e inferior da célula de carga, conforme mostrado na Figura 32. Essa configuração permite medir simultaneamente regiões submetidas à tração e à compressão, maximizando a sensibilidade e compensando efeitos térmicos. Os quatro extensômetros são interligados em uma ponte de Wheatstone (Fig. 33), de modo que o desbalanceamento gerado pela deformação resulte em um sinal elétrico diferencial proporcional à força aplicada.

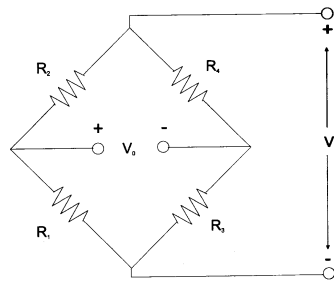


Figura 33 – Ponte de Wheatstone (ProfElectro, n.d.).

No presente projeto, foram selecionadas células de carga do tipo *single point* (Fig. 34). Esse tipo de sensor é projetado para manter a precisão mesmo quando a força aplicada não está perfeitamente centrada, característica que reduz os erros decorrentes de desalinhamentos e deslocamentos laterais durante os ensaios. Além disso, as células *single point* oferecem simplicidade de montagem, custo reduzido e boa compatibilidade com estruturas experimentais modulares, sendo ideais para aplicações acadêmicas e prototipagem.

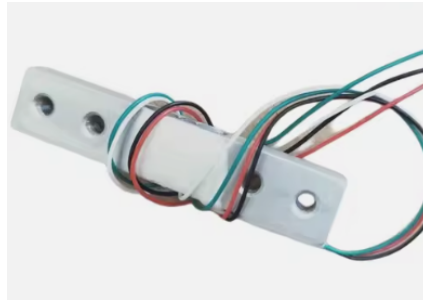


Figura 34 – Célula de carga *single point* (HBM — Hottinger Brüel & Kjær, n.d.).

Foram utilizadas cinco células de carga do tipo *single point*, identificadas como F1, F2, F3, F4 e FD. As células destinadas à medição da força de sustentação (F1, F2, F3, F4) possuem capacidade de 1 kg, enquanto aquelas empregadas na medição da força de arrasto (FD) possuem capacidade de 5 kg. Cada célula foi conectada a um módulo amplificador e conversor analógico-digital HX711 (Fig. 35), responsável pela amplificação do sinal e sua digitalização para interface direta com o microcontrolador. O HX711 é um circuito amplificador com ganho configurável e conversor A/D (Analógico-Digital) de 24 bits, especialmente desenvolvido para aplicações de pesagem e instrumentação com pontes de Wheatstone.

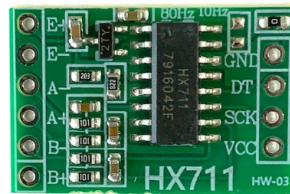


Figura 35 – Módulo amplificador de sinal HX711 (Autor).

O processamento e a aquisição dos dados foram realizados por meio de um microcontrolador *Arduino Uno* (Fig. 36), escolhido por sua interface simples, ampla disponibilidade e compatibilidade com o módulo HX711. A comunicação entre os dispositivos ocorre por meio de duas linhas digitais DT (Data) e SCK (Serial Clock), que estabelecem uma comunicação serial síncrona entre o amplificador e o microcontrolador.

O pino DT é responsável por transmitir o valor digital correspondente à força medida pela célula de carga. Já o pino SCK é controlado pelo Arduino e fornece os pulsos de clock necessários para sincronizar a leitura dos bits enviados pelo HX711. A cada *pulso de clock*, o módulo envia um bit do valor convertido, permitindo ao microcontrolador reconstruir o sinal completo proveniente da ponte de Wheatstone.

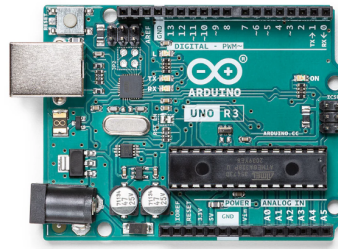


Figura 36 – Microcontrolador Arduino Uno (Autor).

Para garantir a alimentação estável dos módulos, utilizou-se uma fonte externa de 5 V (Fig. 37) conectada a um barramento comum, que distribui tensão e referência de terra (*GND*) a todos os HX711 e ao microcontrolador. Essa conexão de terra comum é essencial para evitar ruídos e discrepâncias de potencial entre os dispositivos, assegurando medições precisas e consistentes.



Figura 37 – Fonte de alimentação de 5 V (Autor).

O diagrama de instrumentação apresentado na Figura 38 ilustra a disposição dos componentes, as interligações elétricas e o barramento de alimentação do sistema de aquisição de dados.

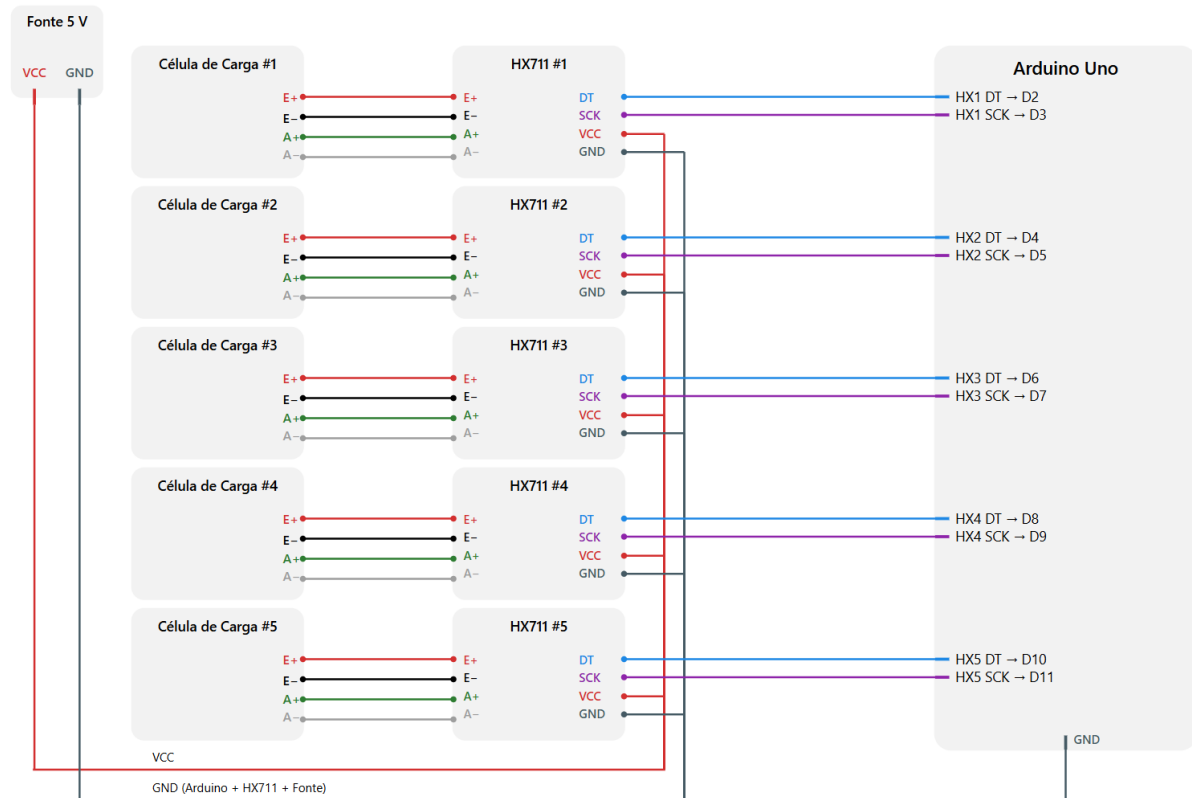


Figura 38 – Diagrama esquemático do sistema de instrumentação (Autor).

5.2.3 Calibração das Células de Carga

Por meio da calibração, estabelece-se uma relação quantitativa entre o sinal elétrico gerado pelos sensores e a força mecânica efetivamente aplicada, permitindo converter os dados obtidos em unidades de engenharia com exatidão. O processo de calibração será realizado utilizando massas conhecidas e o sistema de aquisição de dados. Será feita a verificação do ponto zero de cada célula. Caso necessário, será realizado o ajuste do zero para eliminar desvios ou ruídos de fundo.

Em seguida, será aplicada cargas conhecidas, de forma incremental, diretamente sobre o ponto sensível de cada célula de carga. Para cada incremento de massa, o sinal de saída correspondente será registrado, garantindo que as cargas sejam aplicadas de forma estável e sem sobrecargas que possam comprometer a integridade do sensor. Após atingir a carga máxima planejada, será feita a remoção gradual das massas, também com o registro das respectivas leituras, a fim de avaliar o comportamento do sensor durante a descarga.

Os dados obtidos serão organizados e utilizados para a construção da curva de calibração, representando graficamente a relação entre a força aplicada e a saída elétrica da célula. Considerando que as células de carga operam predominantemente em regime linear dentro de sua faixa nominal, a curva de calibração será ajustada por meio de uma regressão linear, resultando na equação geral:

$$f(V) = kV - t_r \quad (5.11)$$

Nessa equação, k é a constante de calibração, também chamada de sensibilidade da célula de carga, e indica o quanto a força varia em função da variação do sinal elétrico. O termo t_r corresponde ao valor de tara, ou seja, o sinal de saída medido quando nenhuma carga está aplicada ao sensor (TAYLOR, 2009).

Para o processo de calibração, o valor de tara do sensor será redefinido e serão feitas quinze leituras a uma frequência de 2 Hz utilizando um objeto conhecido de massa m_c . A constante de calibração k será determinada dividindo a média das leituras pela força peso do objeto utilizado, conforme descrito na Equação (5.12), onde $\bar{x}$ é a média das leituras e g é a aceleração gravitacional. A média de um conjunto de medidas de n elementos é definida pela Equação (5.13) (MONTES, 2023).

$$k = \frac{\bar{x}}{m_c g} \quad (5.12)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.13)$$

A partir da determinação dos valores de k e t durante o processo de calibração, torna-se possível converter diretamente qualquer sinal medido em sua correspondente força aplicada. A equação de calibração final obtida para cada sensor será implementada no sistema de aquisição de dados, assegurando que as medições realizadas durante os ensaios sejam automaticamente convertidas em unidades de força com base nos coeficientes determinados experimentalmente.

5.2.4 Firmware e Logger

O firmware embarcado no microcontrolador foi integralmente desenvolvido para esta bancada de ensaios, com o objetivo de realizar a aquisição simultânea e o processamento em tempo real dos sinais provenientes das cinco células de carga, cada uma conectada a um módulo condicionador HX711 independente.

A interface entre os sensores e o microcontrolador foi implementada utilizando a biblioteca `HX711.h`, distribuída sob licença MIT (NECULA, 2014). Essa biblioteca, amplamente consolidada para aplicações em sistemas embarcados, realiza a comunicação síncrona com o conversor analógico-digital do módulo HX711 por meio das linhas *DT* e *SCK*. Fornece funções de inicialização, leitura e calibração que permitem a obtenção direta de leituras compensadas e escaladas em unidades físicas. No presente projeto, essa biblioteca foi empregada como base para o firmware desenvolvido, o qual inclui rotinas

adicionais de leitura não bloqueante, cálculo de médias incrementais e armazenamento dos parâmetros de calibração (EEPROM). A EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) é uma memória não volátil integrada ao microcontrolador, usada para armazenar parâmetros de calibração e configurações que precisam ser preservados mesmo após o desligamento. Ou seja, esse tipo de memória permite com que o operador calibre as células uma única vez, pois quando o sistema é inicializado, recarrega as constantes salvas anteriormente.

O microcontrolador atua como núcleo lógico do sistema, executando rotinas dedicadas à leitura dos conversores HX711, à gestão dos parâmetros de calibração, à comunicação serial e à sincronização entre canais. Cada módulo HX711 opera com ganho interno de 128, assegurando resolução adequada para medições de forças na faixa de gramas. A cada ciclo de leitura, o firmware verifica a disponibilidade de nova amostra por meio do sinal `is_ready()`, emite 24 pulsos na linha *SCK* e reconstrói o valor binário correspondente a partir do fluxo recebido pela linha *DT*. Esse valor é convertido em unidade física pela aplicação da constante de calibração e da tara armazenadas na EEPROM.

A arquitetura do firmware segue uma estrutura não bloqueante, evitando o uso de instruções que suspendam o ciclo principal (`loop()`). As leituras são realizadas de forma assíncrona, por sondagem (*polling*) dos canais, permitindo a aquisição simultânea e contínua de todos os sensores sem perda de amostras ou travamentos. As variáveis de estado e os resultados são mantidos em vetores globais, atualizados em tempo real conforme cada módulo responde.

A comunicação com o operador é estabelecida via interface serial a 115200 baud, possibilitando o controle interativo do sistema e o registro automatizado dos dados. O firmware implementa um conjunto de comandos textuais que permitem configurar, calibrar e monitorar o sistema sem necessidade de reprogramação do microcontrolador. Dentre os principais comandos destacam-se:

- **TARE** — executa o ajuste do ponto zero (tara) de um ou de todos os canais;
- **SETWEIGHT** e **CAL** — definem a massa de referência e realizam a calibração automática, calculando o fator de escala (k);
- **RATE** — define a frequência de amostragem e transmissão em milissegundos;
- **STREAM ON/OFF** — inicia ou interrompe o envio contínuo de dados formatados em CSV;
- **MOMCAL** — realiza uma regressão de momento entre o canal de arrasto e os canais de sustentação, compensando acoplamentos parasitas;

- **SAVE/LOAD** — grava ou restaura parâmetros de calibração armazenados na EEPROM;
- **PCLOG ON/OFF** — envia marcadores de início e fim de registro para o computador.

Os dados são transmitidos em formato CSV (*Comma-Separated Values*) estruturado como:

$$t, F1, F2, F3, F4, D, L$$

em que t representa o tempo relativo da amostra em segundos, $F1$ a $F4$ correspondem às forças medidas pelas quatro células de sustentação, D ao canal de arrasto e L à força resultante (soma dos quatro canais de sustentação). Esse formato padronizado simplifica a integração direta com o software de aquisição e análise de dados, assegurando a rastreabilidade e consistência dos registros experimentais.

5.2.4.1 Compensação de Acoplamento e Correção de Momento de Flexão

Um dos principais desafios associados a esse tipo de bancada está relacionado ao momento de flexão gerado nas células de carga responsáveis pela medição da sustentação, induzido pela força de arrasto transmitida pelas hastes de sustentação do modelo. Essas hastes, ao transferirem o esforço de arrasto até as células, introduzem um momento fletor adicional sobre o eixo de medição vertical, ocasionando um acoplamento indesejado entre as componentes de sustentação e de arrasto. Esse acoplamento se manifesta como uma interferência cruzada entre os canais de medição, afetando a linearidade e a fidelidade das leituras de sustentação.

Com o objetivo de mitigar esse efeito, foi desenvolvido o algoritmo **MOMCAL**, implementado diretamente no firmware da bancada. Esse procedimento executa uma regressão linear em tempo real, correlacionando a leitura do canal de arrasto (D) com as leituras dos canais de sustentação ($F1$ – $F4$), de modo a compensar as interferências mecânicas decorrentes do momento de flexão e do acoplamento entre eixos. O algoritmo determina, para cada canal, um par de coeficientes (a_i, b_i) que definem o modelo de correção:

$$F'_i = F_i - (a_i D + b_i),$$

em que F'_i representa a força de sustentação corrigida. Os coeficientes obtidos podem ser aplicados dinamicamente durante os ensaios por meio dos modos **MOMAPPLY** e **MOMADAPT**, assegurando a compensação em tempo real das forças medidas e preservando a precisão sob condições de acoplamento aerodinâmico.

Embora o **MOMCAL** tenha sido concebido como uma ferramenta embarcada de correção automática, no presente trabalho ele foi utilizado apenas como recurso auxiliar para

análise e verificação dos efeitos de flexão. Todas as medições apresentadas foram realizadas com os dados originais das células de carga, sendo a compensação dos momentos de flexão efetuada posteriormente, durante o pós-processamento dos dados experimentais.

5.2.4.2 Integração entre o Firmware e o Logger

A integração do firmware com o ambiente de aquisição em PC é realizada por meio de um script Python desenvolvido em conjunto. Esse software estabelece a comunicação serial, gerencia o envio automático de comandos de controle (`RATE`, `STREAM`, `PCLOG`), armazena as leituras em arquivos CSV e, opcionalmente, exibe gráficos de força em tempo real utilizando a biblioteca `matplotlib`. O protocolo entre o firmware e o *logger* é totalmente determinístico, o que garante consistência e sincronismo entre os dados armazenados e os eventos de aquisição.

O *firmware* foi validado experimentalmente sob condições de operação contínua, demonstrando estabilidade temporal, baixa taxa de erro de comunicação e resposta linear consistente com as características nominais das células de carga. O *firmware* e o *logger* completo, encontram-se nos Apêndices 8 e 9 respectivamente.

5.2.5 Montagem e melhorias

As conexões elétricas entre os sensores e os amplificadores foram realizadas, utilizando terminais *modu* e conectores *Dupont* crimpados, de forma a permitir desmontagem e manutenção simplificadas. As conexões entre os amplificadores e o barramento e microcontrolador foram feitos da mesma forma com fios de cobre flexíveis calibre 26 AWG. Todos os cabos foram revestidos com tubo termorretrátil, fixados à bancada com presilhas do tipo *tie wrap*, garantindo organização e segurança durante os ensaios. O comprimento máximo do chicote é de aproximadamente 80 cm, o que minimiza interferências e perdas de sinal. Essa configuração de conexão e roteamento dos cabos pode ser vista na Figura 39.

Os módulos HX711 foram fixados em suportes impressos em PETG (Fig. 39a), projetados para instalação modular e isolamento elétrico, evitando contato direto com a estrutura metálica da bancada e prevenindo curtos-circuitos. Essa configuração assegura rigidez mecânica, facilidade de montagem e segurança durante a operação do sistema de aquisição.

Adicionalmente, dois perfis estruturais de alumínio de 40 × 20 mm foram fixados à base da estrutura principal, atuando como proteção física para os módulos HX711 e para o chicote de fiação (Fig. 39c). Duas chapas de PETG de 2 mm foram adicionadas para a fixação do microcontrolador e dos conectores de interface, proporcionando melhor organização e proteção dos componentes eletrônicos.

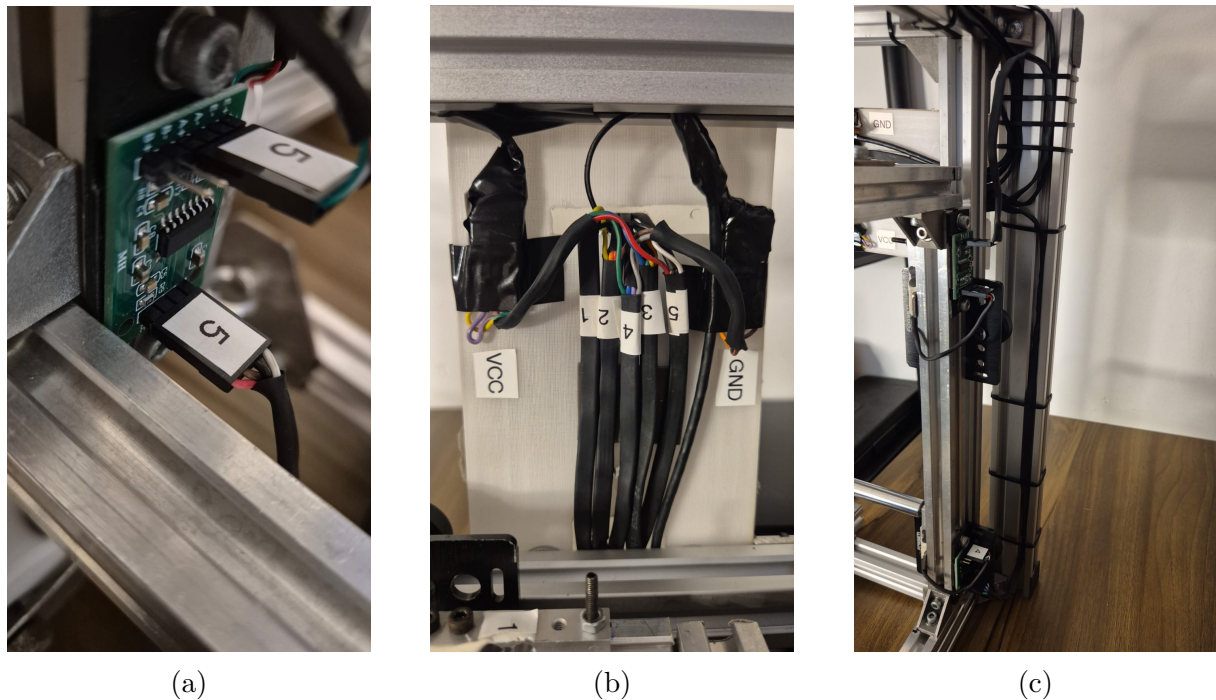


Figura 39 – Conexões elétricas e proteção dos módulos de aquisição: (a) módulo HX711 com terminais Modu/Dupont crimpados; (b) chicote elétrico organizado e identificado; (c) perfis estruturais e roteamento do chicote para proteção mecânica (Autor).

Durante os testes preliminares, verificou-se que o suporte do sensor de medição de arrasto (FD) apresentava deformação por flexão, decorrente do momento atuante na haste de fixação. Para mitigar esse efeito, foi instalado transversalmente um perfil tubular de 20×20 mm, atuando como reforço estrutural e aumentando a rigidez do conjunto, conforme ilustrado nas Fig. 40a e 40b.

Cada célula de carga foi fixada à bancada por meio de dois parafusos M3 e porcas tipo martelo, solução que confere maior rigidez ao conjunto e impede a rotação da célula em torno de seu eixo de fixação, além de permitir o ajuste modular de sua posição conforme necessário, conforme mostrado na Fig. 40c. Com o objetivo de garantir o alinhamento geométrico entre todas as células de sustentação, foi ainda confeccionada uma chapa de aço de gabarito, respeitando as posições correspondentes às bitolas dianteira e traseira e ao entre-eixos do protótipo de teste.

Para a calibração da célula de carga responsável pela medição do arrasto, foi utilizada uma roldana de nylon fixada à estrutura da bancada e alinhada com o terminal olhal acoplado à chapa de acionamento do sensor, assegurando a aplicação precisa da força na direção desejada. As calibrações das demais células foram realizadas utilizando massas conhecidas e conjuntos de parafusos, porcas e arruelas aplicados sob o manípulo do eixo de alumínio de cada célula de sustentação, conforme mostrado nas Fig. 40a e 40b.

Foram confeccionadas orelhas de fixação em chapa de aço com 2 mm de espessura,

dotadas de insertos roscáveis (*rivnuts*) de M6, projetadas para encaixe externo e fixação modular à bancada por meio de dois parafusos M4. Esse conjunto permite a conexão direta da bancada aos flanges do túnel de vento (encaixe M6). Para garantir o correto posicionamento, foi desenvolvida uma ferramenta de gabarito destinada ao alinhamento preciso das orelhas, respeitando o espaçamento entre os furos dos flanges do túnel de vento. Como o comprimento da bancada é inferior ao espaçamento entre os flanges do túnel, também foram confeccionados espaçadores de alumínio a fim de assegurar o encaixe, a fixação e a instalação adequadas do conjunto. Sendo uma possível observação das orelhas de fixação, através das Figuras 40a e 40b. Para encaixar os insertos roscáveis nas posições determinadas, também foi necessário aumentar o comprimento de alguns dos perfis extrudados 20x20mm da estrutura fixa principal.

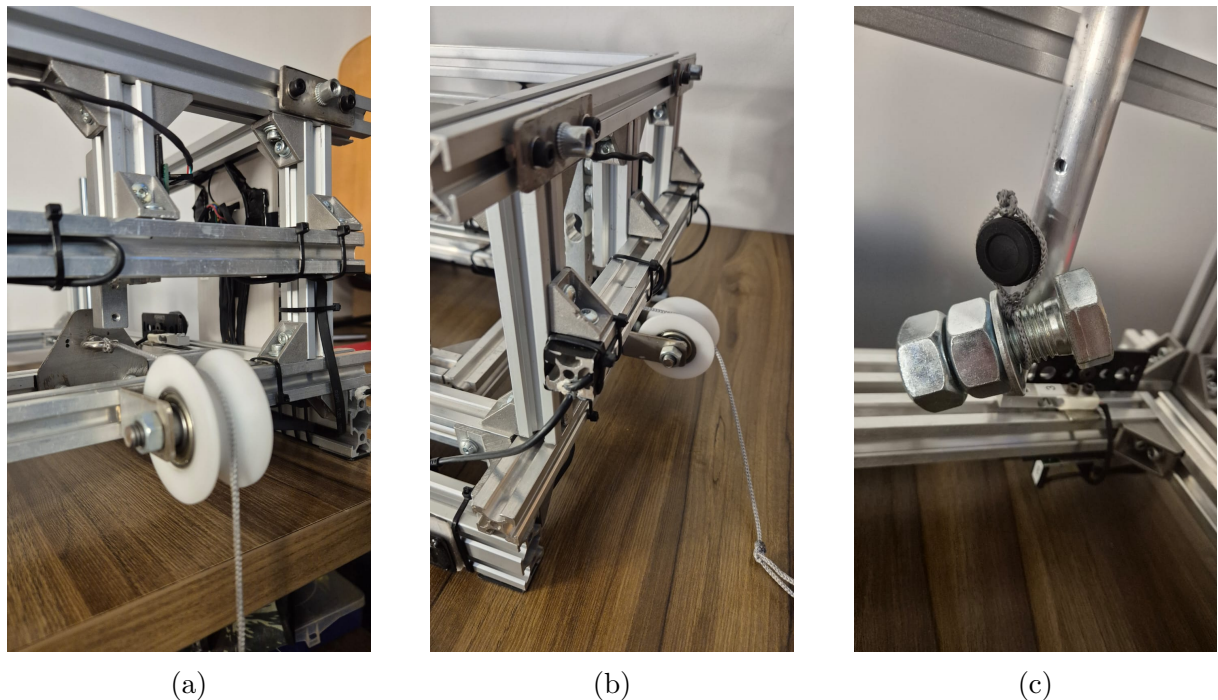


Figura 40 – Detalhes do sistema de calibração e fixação da bancada: (a) roldana de nylon utilizada na calibração da célula de arrasto; (b) perfil tubular 20×20 mm atuando como reforço estrutural do suporte FD, e acima, orelhas de fixação em chapa de aço e insertos roscáveis; (c) fixação da célula de carga de sustentação com parafusos M3 e conjunto de massas para calibração (Autor).

Após a montagem e a implementação das melhorias na bancada, foram obtidos ensaios satisfatórios, nos quais todos os sistemas mecânicos, elétricos e embarcados operaram de forma estável, sem interrupções ou falhas. As células de carga apresentaram variação de apenas poucas gramas após a calibração e, mesmo após a aplicação e posterior remoção da carga de arrasto por meio da roldana, mantiveram uma deriva residual baixa.

A Figura 41 apresenta a bancada de ensaios finalizada, após a montagem completa

do sistema elétrico e a implementação das melhorias descritas anteriormente.

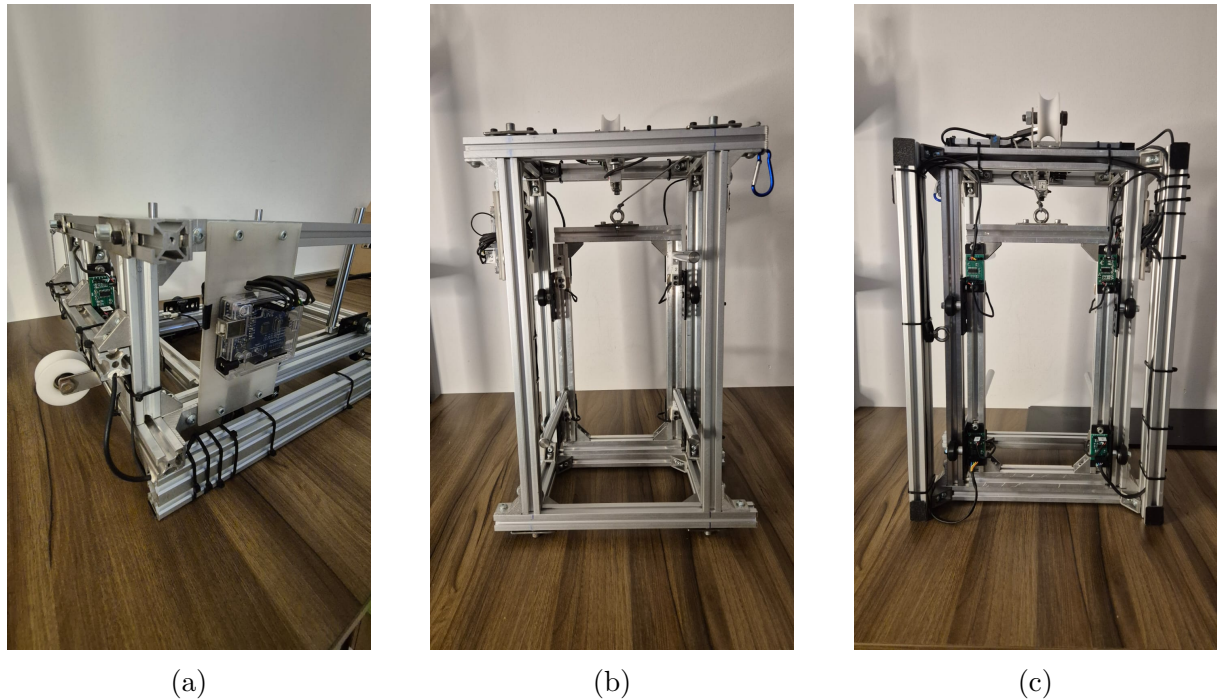
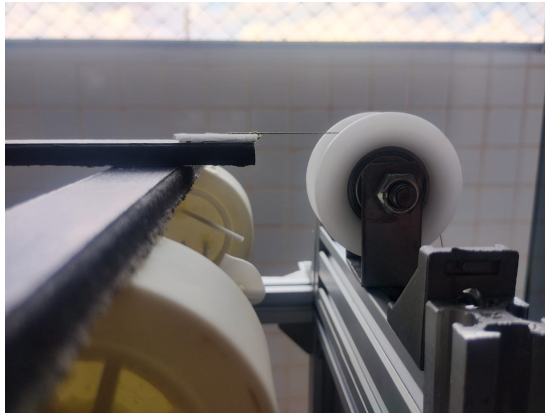


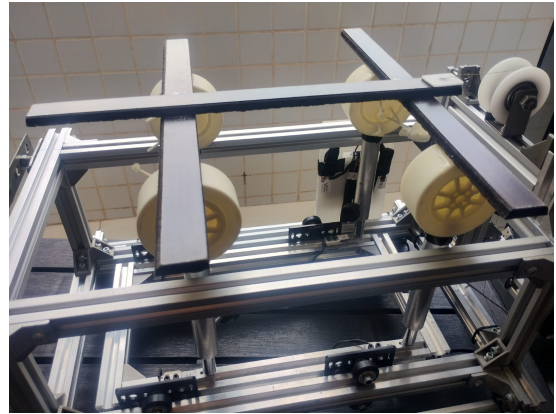
Figura 41 – Vista geral da bancada de ensaios finalizada após montagem e implementação das melhorias (Autor).

5.3 Análise e medição do momento de flexão

Para a determinação do momento de flexão decorrente da força de arrasto (conforme descrito na Seção 5.2.4.1), foi construída uma estrutura auxiliar modular composta por uma roldana e um sistema de corda tensionada, alinhado aos eixos vertical e horizontal. Adicionalmente, foi montado um protótipo reduzido com rodas e hastes interligadas, representando o acoplamento mecânico real do veículo, de modo a reproduzir com maior fidelidade as condições de carregamento experimentadas pelo protótipo em ensaio (Fig 42). Esse arranjo foi colocado sob a bancada, sendo apoiado verticalmente sob as hastes de medição da sustentação. Essa configuração permite medir e determinar o momento de flexão sentido pelas células de medição da sustentação, acopladas a Força de arrasto.



(a)



(b)

Figura 42 – Estrutura auxiliar modular para determinação do momento de flexão devido à força de arrasto (conforme a figura 29): (a) detalhe da roldana e do sistema de corda tensionada; (b) vista superior do protótipo reduzido com rodas e hastes interligadas montado sobre a estrutura de ensaio (Autor).

Para a realização da medição, aplicou-se à corda que passa pela roldana uma carga composta por massas previamente calibradas, tracionando o protótipo durante um intervalo de tempo e emulando a força de arrasto D . Na análise dessas medições, considerou-se o braço de alavanca correspondente ao comprimento de cada haste, determinado previamente no túnel de vento.

A Figura 43 apresenta o gráfico das leituras da célula de carga de arrasto (D) e dos momentos registrados pelas quatro células de sustentação (F_1 , F_2 , F_3 e F_4), todos expressos em gramas (a disposição das células pode ser vista na figura 29). Observa-se um comportamento em forma de “degraus”, resultado direto da adição sucessiva de massas ao sistema. Cada incremento de peso aplicado à corda gera uma variação bem definida nos sinais medidos, evidenciando a resposta das células de carga às diferentes magnitudes de força impostas ao protótipo. Essa configuração experimental permite avaliar de forma direta a influência da força de arrasto sobre a deformação das células de sustentação.

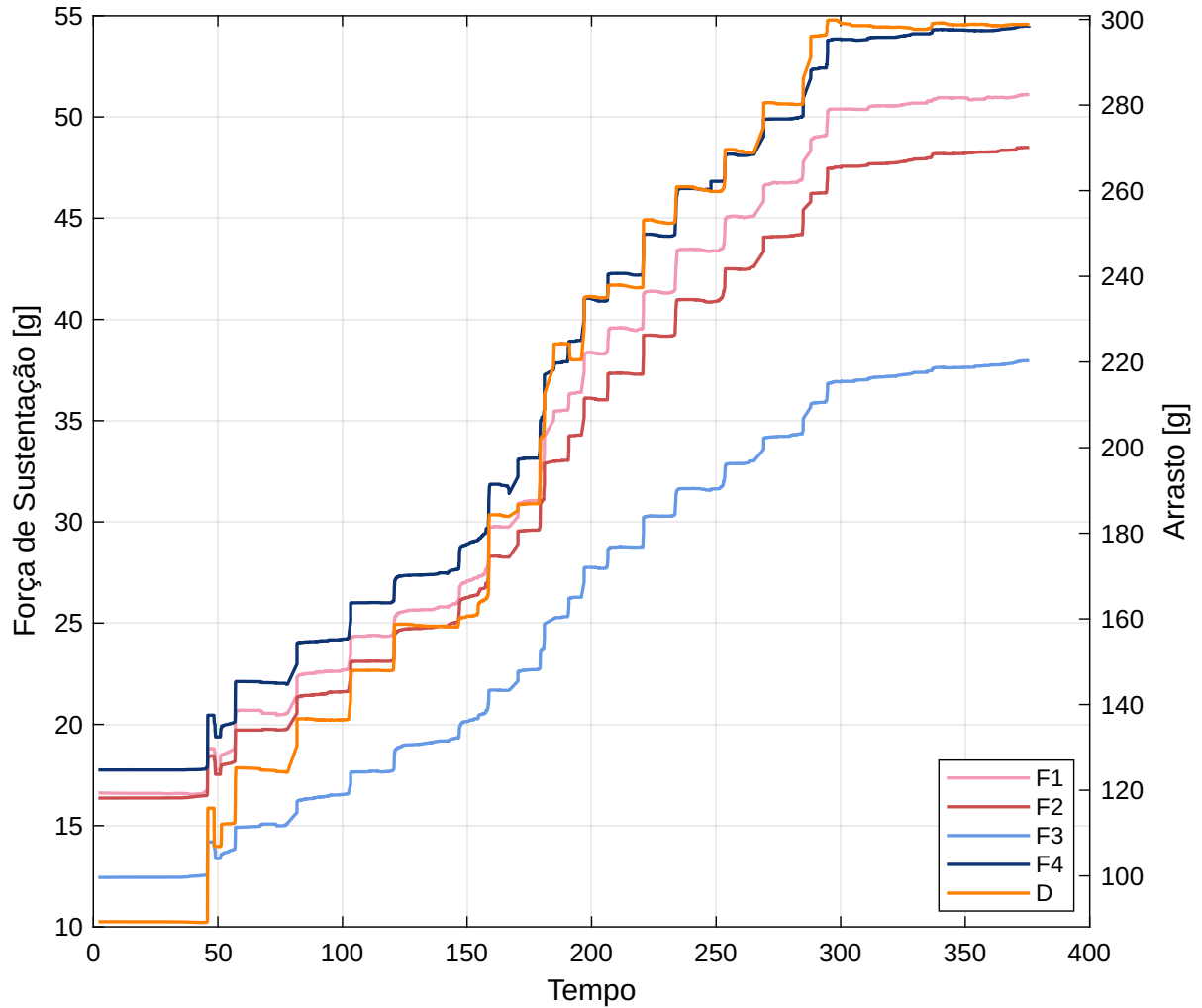


Figura 43 – Leituras das células de sustentação (F_1 – F_4) e da célula de arrasto (D), mostrando o acoplamento entre as forças devido ao momento de flexão. (Autor).

Os sinais provenientes das cinco células de carga mostrados na figura 43, foram pós-processados em MATLAB com o objetivo de remover picos indesejados e reduzir o ruído de fundo, preservando o comportamento em degraus característico do sistema. Esse processamento é feito utilizando um filtro mediana. Esse filtro foi escolhido porque remove ruídos impulsivos como picos abruptos e pequenas vibrações sem alterar tanto a forma real do sinal.

Após a filtragem, o banco de dados resultante apresenta uma resposta limpa, contínua e fisicamente coerente, permitindo a aplicação de técnicas de interpolação no pós-processamento. Isso possibilita desacoplar os efeitos do arrasto e do momento de flexão atuando sobre as células de sustentação, de modo a quantificar separadamente a contribuição de cada fenômeno nos ensaios experimentais.

Para facilitar a visualização do comportamento em degraus observado no gráfico, adotou-se uma convenção de sinal em que o momento positivo corresponde ao efeito cortante da força de arrasto, tracionado as fibras superiores das células F_1 e F_2 e compri-

minho as fibras superiores das células F3 e F4 (Figura 29). As correções e interpretações necessárias decorrentes dessa convenção foram aplicadas posteriormente durante o pós-processamento dos dados experimentais.

5.4 Prototipagem em impressão 3D

Para a prototipagem, foi desenvolvido um modelo tridimensional em ambiente CAD, com o objetivo de integrar todos os componentes, e formar a geometria completa do veículo, como a conexão entre a asa traseira e chassi e a conexão entre a asa dianteira e a carenagem frontal (Fig. 44). Determinadas seções internas foram simplificadas para otimizar o processo de manufatura aditiva, sem afetar significativamente o comportamento do escoamento. Adicionalmente, o modelo foi adaptado no CAD para possibilitar a fixação adequada na bancada de ensaios.

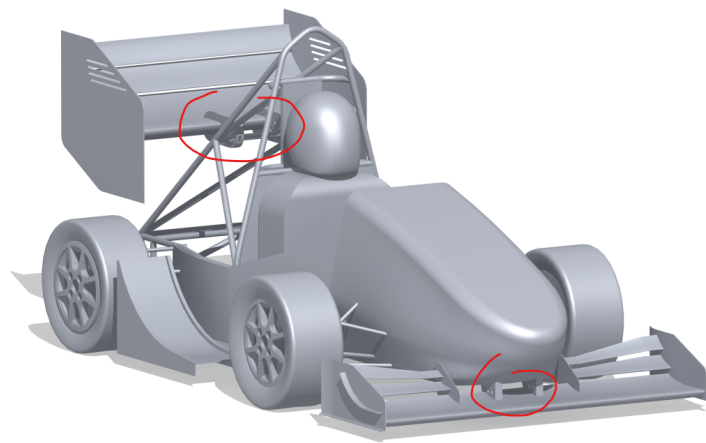


Figura 44 – Modelo CAD do veículo em escala com destaque das regiões de conexão estrutural das asas (Autor).

O protótipo, em escala 1:8, foi segmentado em componentes modulares, projetados com encaixes para facilitar a montagem e garantir a rigidez estrutural. A Tabela 11 apresenta a lista de peças fabricadas para os dois modelos: com e sem pacote aerodinâmico. Ambos os modelos compartilham a mesma base veicular, sendo a diferença a substituição do assoalho por um conjunto composto por difusor, assoalho e defletores, além da adição das asas dianteira e traseira. Devido às limitações dimensionais da impressora, algumas peças, como o chassi, foram divididas em duas partes.

ID	Peças
1	Chassis Traseiro
2	Chassi Dianteiro
3	Carenagem Frontal (Nose)
4	Carenagem Lateral Direita (BSR)
5	Carenagem Lateral Esquerda (BSL)
6	Roda Dianteira Direita (FWR)
7	Roda Dianteira Esquerda (FWL)
8	Roda Traseira Direita (RWR)
9	Roda Traseira Esquerda (RWL)
10	Difusor, Assoalho e Defletores
11	Assoalho
12	Asa Dianteira (FW)
13	Asa Traseira (RWC)
14	Piloto
15	Gabarito Principal
16	Gabarito Esquerdo
17	Gabarito Direito

Tabela 11 – Lista de peças do protótipo

As peças foram fabricadas por meio de impressão 3D utilizando resina do tipo ABS-Like e tecnologia SLA (Estereolitografia). Foram empregadas a resina ABS-Like da Elegoo e a resina fotopolimerizável UV 3DMA Fastness. Optou-se pelo uso da resina ABS-Like na maior parte da estrutura do veículo, em função de suas melhores propriedades mecânicas e maior ductilidade, conforme observado em impressões preliminares. Para os dispositivos geradores de *downforce* (assoalho, difusor, defletores, asa dianteira e asa traseira), foi preferida a resina SLA, por conferir maior rigidez às superfícies delgadas, mantendo flaps e regiões finas do difusor estáveis na posição projetada.

A impressora utilizada foi a Elegoo Saturn 3 Ultra (Fig. 45), cujas principais especificações de impressão estão apresentadas na Figura 46.

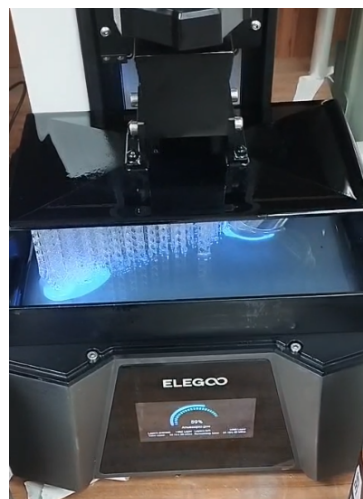


Figura 45 – Impressora Elegoo Saturn 3 Ultra (Autor).

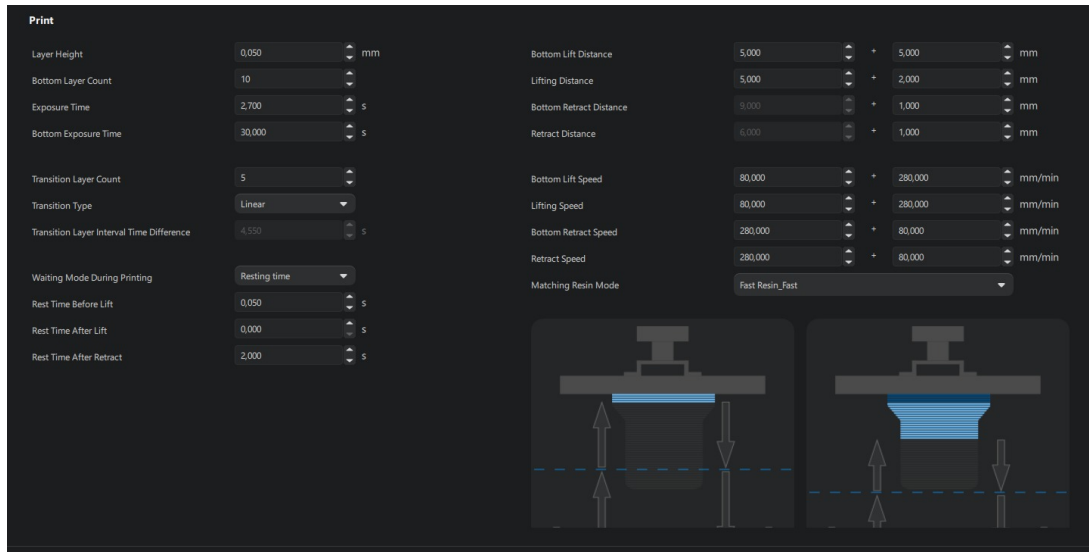


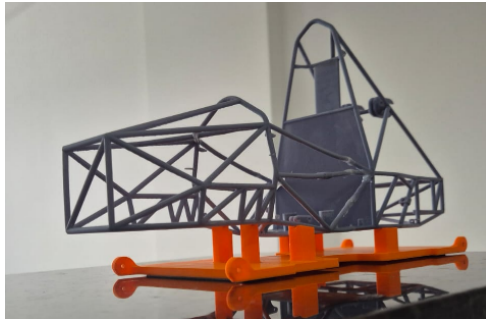
Figura 46 – Configurações de impressão em resina ABS-like e SLA (Autor).

Devido à complexidade geométrica de alguns componentes e à presença de superfícies de pequena espessura, foi necessária a utilização de suportes de impressão. A reação de cura da resina gera tensões internas que tendem a contrair o material, sendo essa taxa de contração não uniforme ao longo do processo; como consequência, algumas peças apresentaram empenamentos e torções. As dimensões finais foram verificadas com auxílio de um paquímetro, e os desvios em relação ao modelo CAD foram baixos para todas as peças.

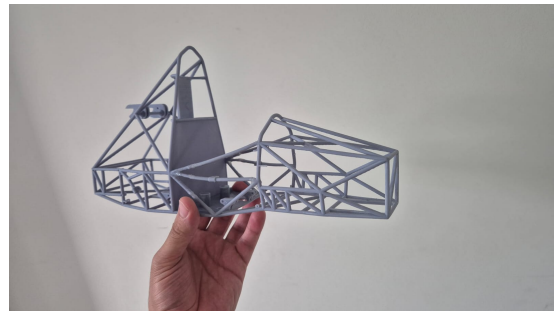
Em função dessas não conformidades, após a impressão as peças passaram por um processo de pós-acabamento, incluindo lixamento com lixas d'água de grãos 400, 600 e 1200, para remoção dos pontos de apoio dos suportes e melhoria da qualidade superficial, sem remoção excessiva de material. Adicionalmente, utilizou-se um soprador térmico, em conjunto com os gabaritos de montagem e fitas de fixação, para recuperar a geometria de peças empenadas, promovendo sua conformação ao molde original.

Esses procedimentos de pós-processamento de impressão permitiram a aproximação da geometria final à forma prevista em projeto. De modo geral, considerando a complexidade do conjunto, os erros de fabricação permaneceram dentro de uma faixa aceitável, preservando-se a geometria global, e os ajustes de pós-processamento mitigaram as principais imperfeições de impressão.

Concluída essa etapa, iniciou-se o processo de montagem das peças. A fixação das peças foi realizada por meio de arames e adesivo epóxi (por exemplo, na junção entre o chassi dianteiro e o traseiro). Na Figura 47, observa-se o chassi durante o posicionamento sobre o gabarito principal e o chassi final montado.



(a)

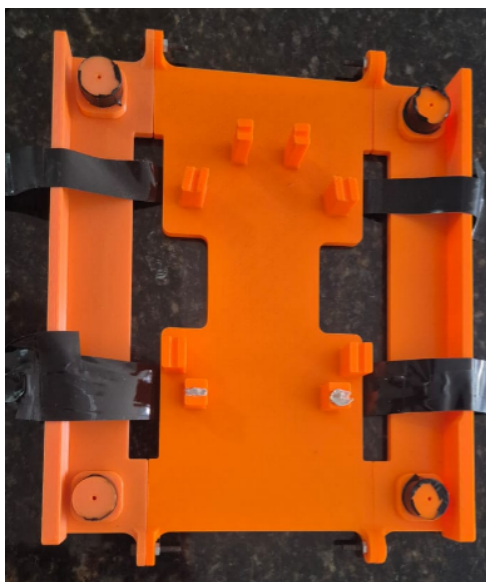


(b)

Figura 47 – Montagem do chassi do protótipo: (a) posicionamento e alinhamento do chassi sobre o gabarito principal; (b) chassi traseiro e dianteiro unidos após fixação com adesivo epóxi (Autor).

Alguns componentes com superfícies mais delgadas sofreram fraturas durante o manuseio e precisaram ser reparados com adesivo à base de cianoacrilato, seguido de lixamento para redução das marcas de colagem. As quebras ocorreram de forma predominantemente limpa, sem estilhaçamento, o que facilitou o reencaixe e a recuperação geométrica das peças.

Para garantir a correta montagem do protótipo, foram projetados gabaritos de alinhamento (mencionados na tabela 11) impressos em FDM com material ABS. O gabarito principal foi utilizado para a união precisa dos dois segmentos do chassi, enquanto os gabaritos laterais asseguraram o posicionamento adequado das rodas (Fig. 48).



(a)



(b)

Figura 48 – Gabaritos de alinhamento do protótipo: (a) gabaritos impressos utilizados para união do chassi e posicionamento correto das rodas; (b) aplicação do gabarito na montagem do veículo em escala. (Autor).

Os protótipos completamente montados, nas versões com e sem pacote aerodinâmico, são mostrados nas Figuras 49 e 50.

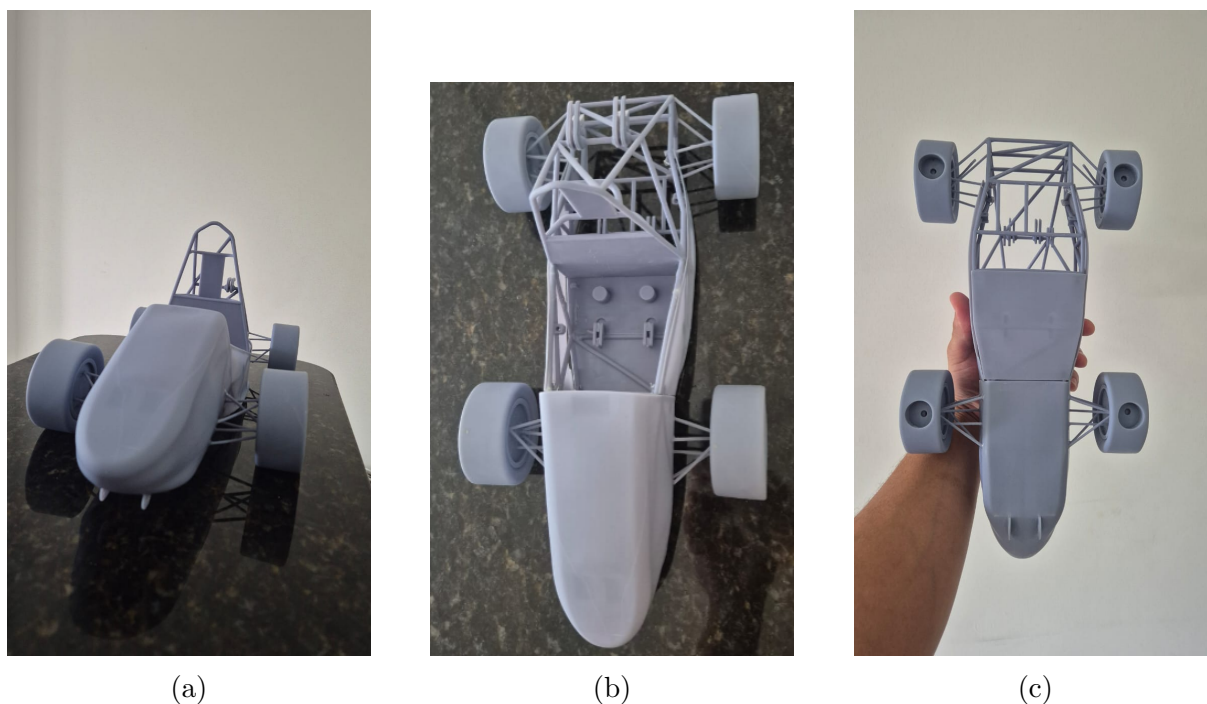
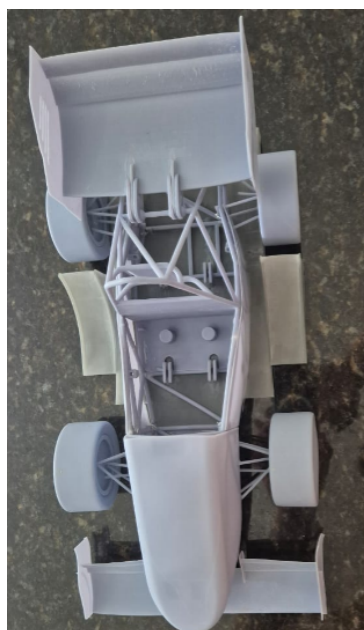


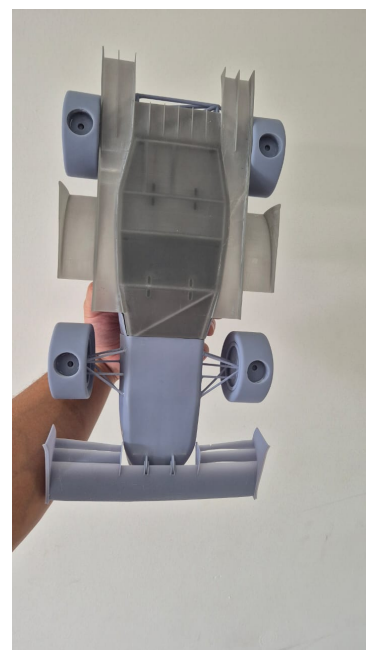
Figura 49 – Protótipo em escala sem pacote aerodinâmico: (a) vista em perspectiva do veículo montado; (b) vista superior evidenciando o cockpit e a geometria do chassi; (c) vista inferior destacando os furos de encaixe das hastes de medição do arrasto nas rodas (Autor).



(a)



(b)



(c)

Figura 50 – Protótipo em escala com pacote aerodinâmico: (a) vista em perspectiva do veículo montado; (b) vista superior evidenciando o cockpit e a geometria do chassi; (c) vista inferior destacando os furos de encaixe das hastes de medição do arrasto nas rodas (Autor).

Por fim, a Figura 51 apresenta uma imagem de referência dimensional, que permite ter uma noção das proporções do protótipo.

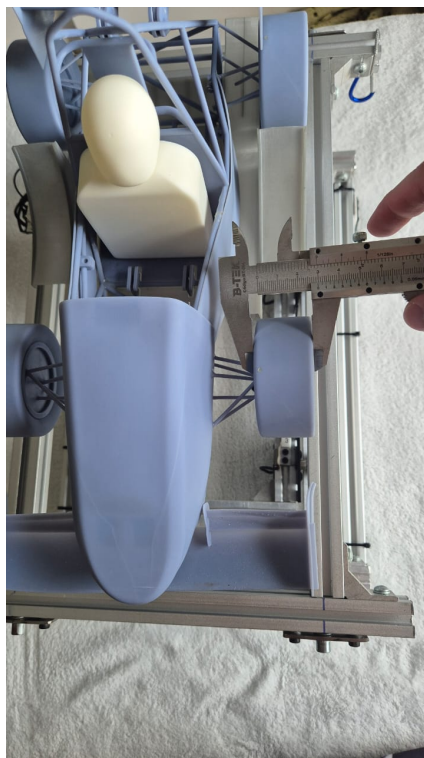
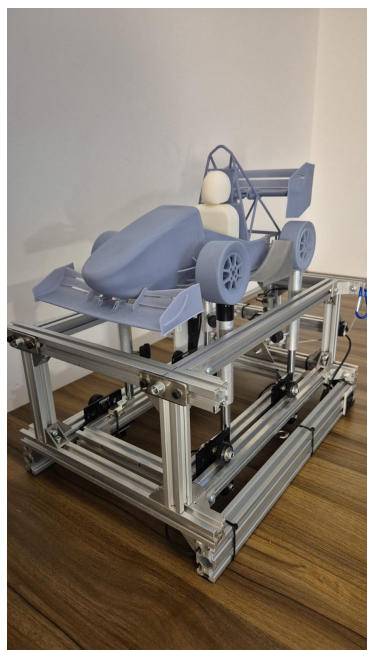
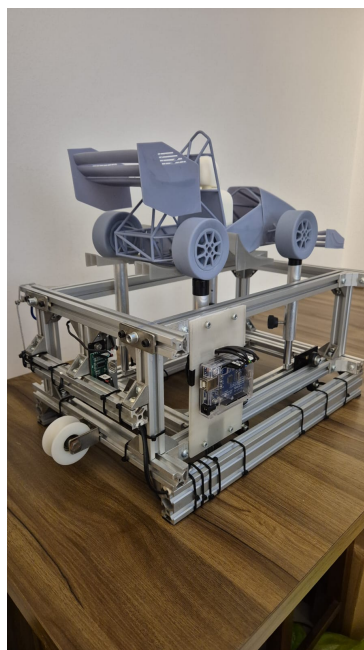


Figura 51 – Vista superior do protótipo em escala com medição dimensional por paquímetro de escala milimétrica na bancada de ensaios (Autor).

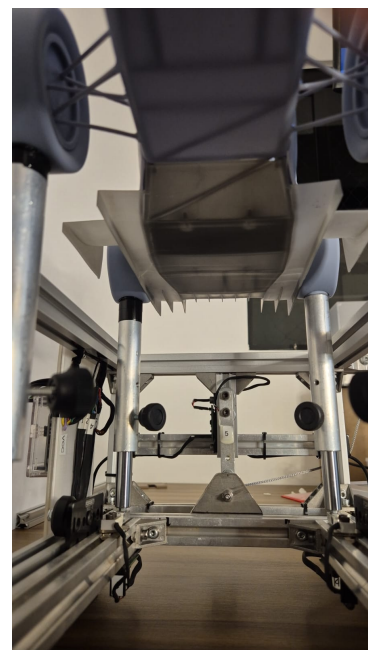
A Figura 52 apresenta o protótipo em escala equipado com o pacote aerodinâmico, instalado sobre a bancada de testes.



(a)



(b)



(c)

Figura 52 – Protótipo em escala com pacote aerodinâmico montado sob a bancada de ensaios (Autor).

5.5 Preparação para o ensaio

Inicialmente, procedeu-se à instalação da bancada experimental no interior do túnel de vento, fixando-a rigidamente aos flanges estruturais do equipamento. Essa fixação garantiu elevada estabilidade durante todo o procedimento. Em seguida, foram realizados quatro furos na bancada para a passagem dos eixos que conectam as rodas às células de carga responsáveis pela medição das forças de sustentação (F_1 , F_2 , F_3 e F_4) (Fig. 53a).

Posteriormente, o modelo em escala foi posicionado no interior do túnel com o auxílio de um gabarito de altura, desenvolvido para assegurar que o veículo permanecesse exatamente na cota vertical definida para o experimento. Após o alinhamento, os eixos foram travados por meio de manípulos, garantindo a manutenção precisa da altura durante os ensaios aerodinâmicos (Fig. 53b). Na Figura 53c, observa-se a bancada já instalada, juntamente com o protótipo do veículo em escala sem pacote aerodinâmico. Ressalta-se que o mesmo procedimento de posicionamento preciso, alinhamento e fixação adotado para esse modelo foi igualmente aplicado ao modelo com o pacote aerodinâmico.

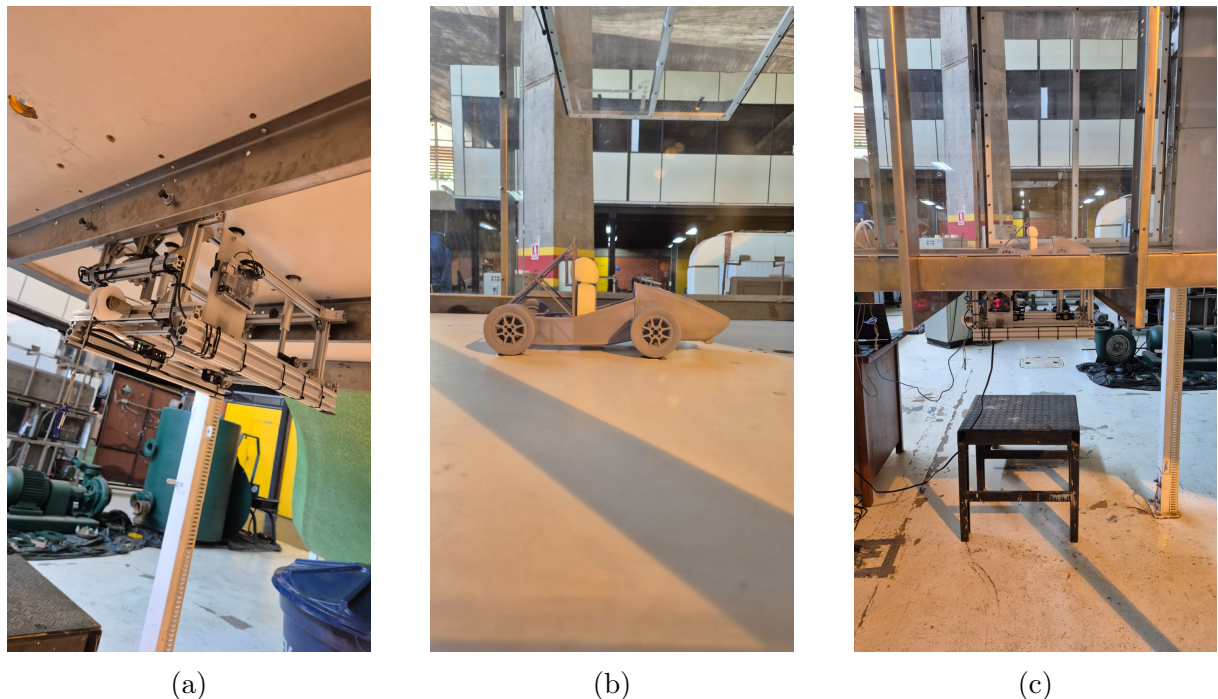


Figura 53 – Instalação da bancada experimental no túnel de vento, posicionamento do modelo em escala com auxílio do gabarito de altura e conjunto bancada-veículo após o alinhamento (Autor).

Os orifícios residuais presentes no chão do túnel de vento, provenientes de experimentos anteriores, foram selados utilizando fita crepe. Essa etapa visou minimizar perturbações no escoamento interno, reduzindo interferências indesejadas na distribuição de pressão ao redor do modelo.

Na sequência, procedeu-se à calibração das cinco células de carga do sistema, sem-

pre realizada previamente a cada experimento. Para isso, aplicaram-se massas conhecidas próximas ao fundo de escala de cada sensor, permitindo determinar a curva de calibração individual e minimizar a incerteza associada às medições de força.

Por fim, o túnel de vento foi acionado em baixa velocidade com o objetivo de verificar o correto funcionamento das células de carga, bem como do sistema de aquisição de dados e do logger. Nesta etapa também se avaliou o comportamento do manômetro diferencial utilizado para a medição da altura da coluna d'água h , assegurando que todos os instrumentos estivessem operando adequadamente antes do início dos ensaios.

6 Resultados

Este capítulo apresenta, analisa e discute os resultados obtidos nos ensaios aerodinâmicos realizados no túnel de vento do LEA.

Foram conduzidos dois experimentos distintos, o primeiro utilizando o veículo sem o pacote aerodinâmico e o segundo considerando o modelo completo, composto por assoalho, difusor, defletores, asa dianteira e asa traseira. O objetivo de ambos os ensaios foi avaliar o comportamento aerodinâmico do veículo em escala reduzida sob condições idênticas de escoamento, bem como comparar os resultados experimentais obtidos com aqueles previstos nas simulações CFD.

Para ambas as configurações, buscou-se atingir uma velocidade de escoamento livre de aproximadamente 60 km/h (16,67 m/s). De acordo com a calibração do sistema de medição, essa velocidade corresponde a uma leitura de aproximadamente 15.5 mmH₂O no manômetro diferencial acoplado ao tubo de Pitot. Todos os ensaios foram realizados com uma taxa de amostragem de 10 Hz em um período de 65s, totalizando 650 amostras.

A configuração dos sensores foi estabelecida da seguinte forma: O sensor F1 corresponde à roda traseira direita, o F2 à roda traseira esquerda, o F3 à roda dianteira esquerda e o F4 à roda dianteira direita. Essa configuração permite avaliar a distribuição da sustentação. Durante os ensaios observou-se que as células de carga apresentaram uma variação residual de até +2,5 g e aproximadamente -2,5 g, permanecendo dentro dessa faixa de oscilação após o término das medições.

Os dados das células de carga foram processados em *MATLAB* a partir do arquivo de log bruto (CSV), cada canal foi analisado para detectar valores que se desviam significativamente do comportamento típico do sinal, usando a mediana móvel com janela de 11 amostras, além da imposição de um limite de amplitude de ± 500 g. A mediana móvel, é um filtro que compara cada amostra com a mediana calculada em uma vizinhança local. Nesse trabalho, utilizou-se uma janela de 11 amostras, o que significa que cada ponto foi avaliado considerando os cinco valores anteriores, o próprio valor e os cinco seguintes. Valores que se afastam excessivamente dessa mediana local foram identificados como inconsistências e removidos do conjunto de dados.

6.1 Modelo sem pacote aerodinâmico

Na Figura 54, observa-se o protótipo do veículo sem o pacote aerodinâmico instalado no túnel de vento antes do início do experimento.

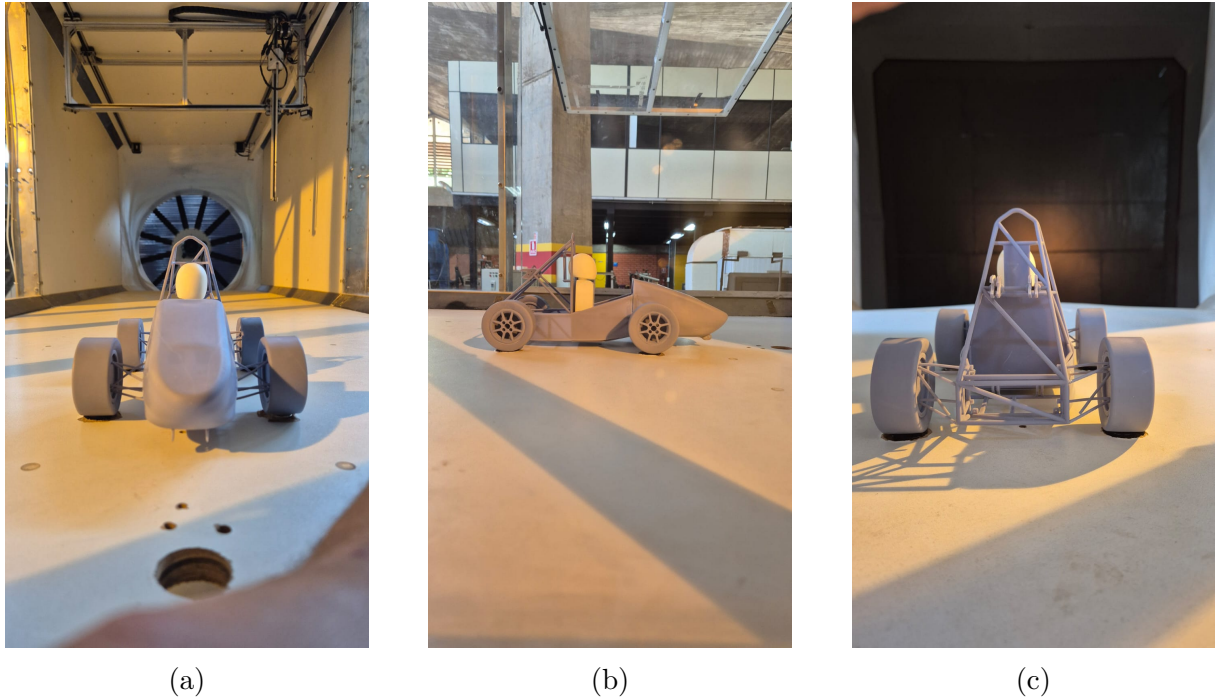


Figura 54 – Vistas frontal (a), lateral (b) e traseira (c) do protótipo do veículo sem pacote aerodinâmico instalado no túnel de vento antes do início do experimento (Autor).

O gráfico da Figura 55 apresenta os resultados pós-processados, exibindo a evolução temporal das forças medidas em gramas. Nele, é possível comparar diretamente a força de arrasto (D) com as forças de sustentação registradas individualmente em cada roda (F_1 , F_2 , F_3 , F_4), bem como a sustentação total (L), obtida pela soma desses quatro canais.

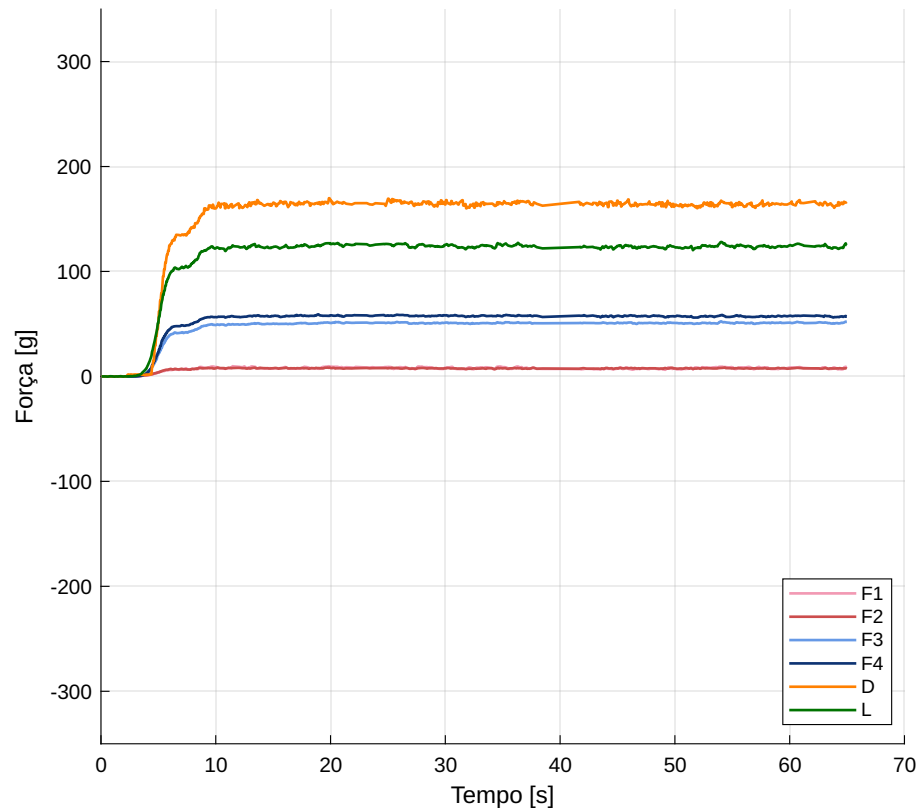


Figura 55 – Forças medidas durante o ensaio do modelo sem pacote aerodinâmico (Autor).

O valor médio e o desvio-padrão obtido para cada sinal representado no gráfico 55 encontra-se apresentado na Tabela 12. Para o cálculo dos desvios-padrão, considerou-se a janela temporal de 15s a 65s.

Métrica	F1 [g]	F2 [g]	F3 [g]	F4 [g]	F5 [g]	L [g]
Valor Médio	7,61	8,08	50,49	57,10	165,47	123,27
Desvio Padrão	0,773	0,262	0,549	0,549	1,744	1,401

Tabela 12 – Valores médios e desvio-padrão das forças medidas durante o ensaio do modelo sem pacote aerodinâmico (Autor).

Após aplicar o ajuste e a correção referentes à interferência do momento de flexão discutida na Seção 5.3, obtêm-se o gráfico apresentado na Figura 56 e os valores correspondentes resumidos na Tabela 13.

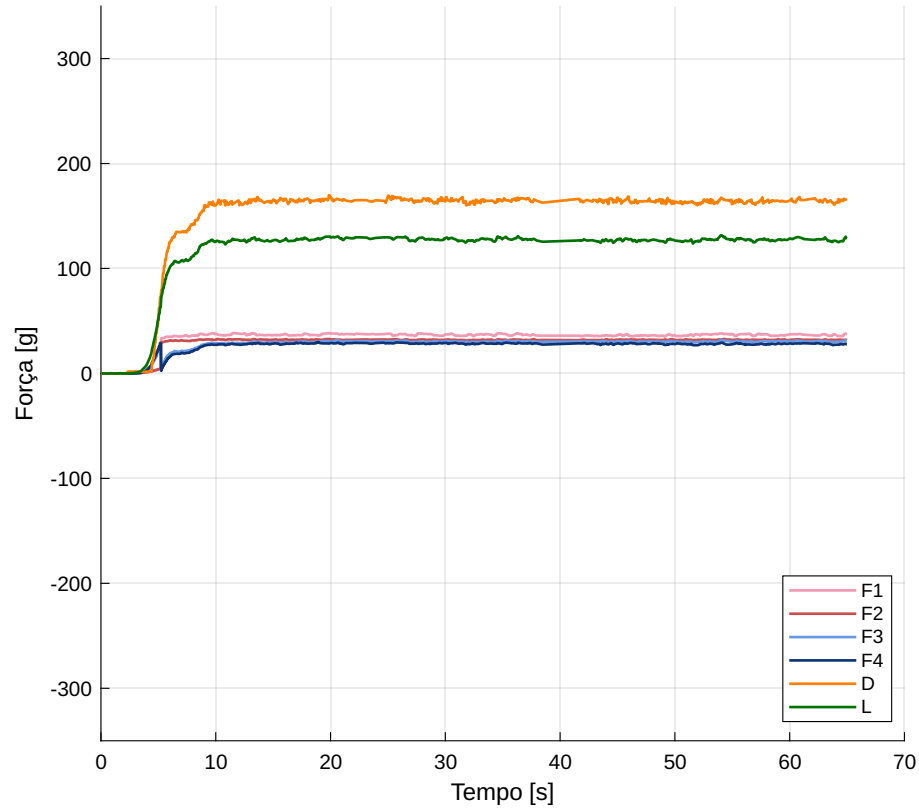


Figura 56 – Forças medidas durante o ensaio do modelo sem pacote aerodinâmico, após a correção da interferência do momento de flexão (Autor).

F1 [g]	F2 [g]	F3 [g]	F4 [g]	D [g]	L [g]
36,39	32,46	30,01	27,89	165,47	126,75

Tabela 13 – Valores médios das forças medidas durante o ensaio do modelo sem pacote aerodinâmico, após a correção da interferência do momento de flexão (Autor).

Pode-se observar que antes da correção (Figura 55), as células dianteiras registram valores artificialmente maiores devido à deformação estrutural causada pelo arrasto, distorcendo a distribuição de sustentação, embora a soma total (L) permaneça coerente. Após a correção (Figura 56), a sustentação (positiva) se distribui de forma relativamente uniforme entre as quatro células. A força total (L) e o arrasto (D) permanecem praticamente inalterados.

6.2 Modelo com pacote aerodinâmico

Na Figura 54, observa-se o protótipo do veículo com pacote aerodinâmico instalado no túnel de vento antes do início do experimento.

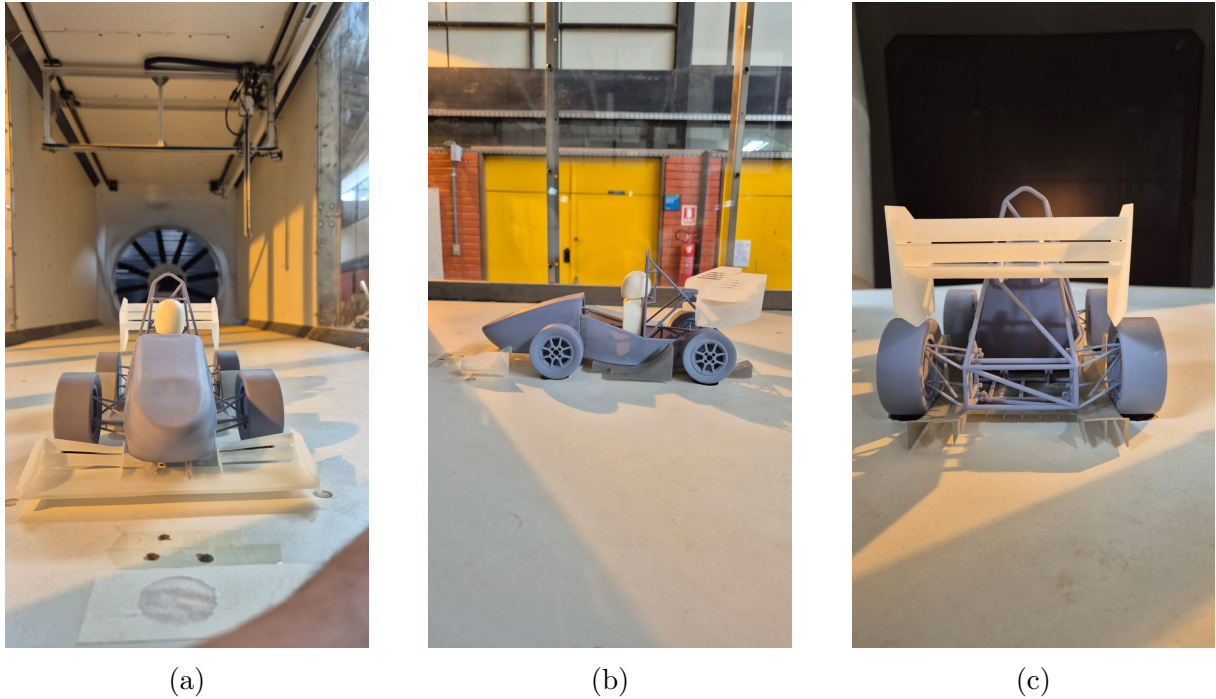


Figura 57 – Vistas frontal (a), lateral (b) e traseira (c) do protótipo do veículo com pacote aerodinâmico instalado no túnel de vento antes do início do experimento (Autor).

O gráfico da Figura 58 apresenta os resultados pós-processados, exibindo a evolução temporal das forças medidas em gramas. Nele, é possível comparar diretamente a força de arrasto (D) com as forças de sustentação registradas individualmente em cada roda (F_1 , F_2 , F_3 , F_4), bem como a sustentação total (L), obtida pela soma desses quatro canais.

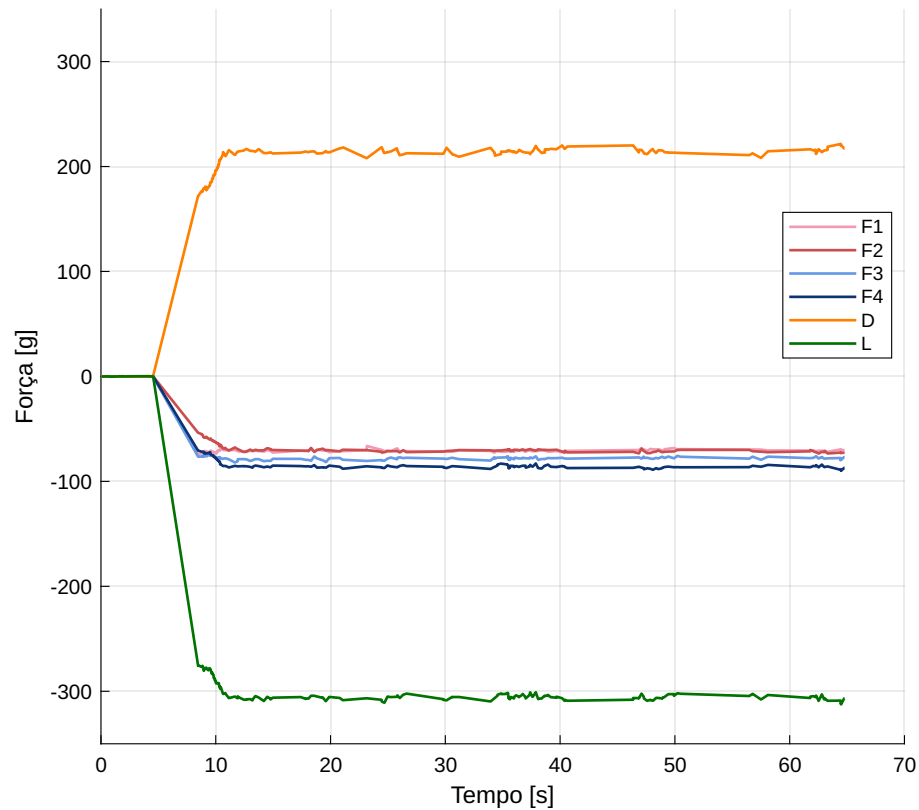


Figura 58 – Forças medidas durante o ensaio do modelo com pacote aerodinâmico (Autor).

O valor médio e o desvio-padrão obtido para cada sinal representado no gráfico 58 encontra-se apresentado na Tabela 14. Para o cálculo dos desvios-padrão, considerou-se a janela temporal de 15s a 65s.

Métrica	F1 [g]	F2 [g]	F3 [g]	F4 [g]	F5 [g]	L [g]
Valor Médio	-70,88	-71,36	-79,51	-86,12	213,85	-307,87
Desvio Padrão	1,159	1,126	1,189	1,265	2,692	2,528

Tabela 14 – Valores médios e desvio-padrão das forças medidas durante o ensaio do modelo com pacote aerodinâmico (Autor).

Após aplicar o ajuste e a correção referentes à interferência do momento de flexão discutida na Seção 5.3, obtêm-se o gráfico apresentado na Figura 59 e os valores correspondentes resumidos na Tabela 15.

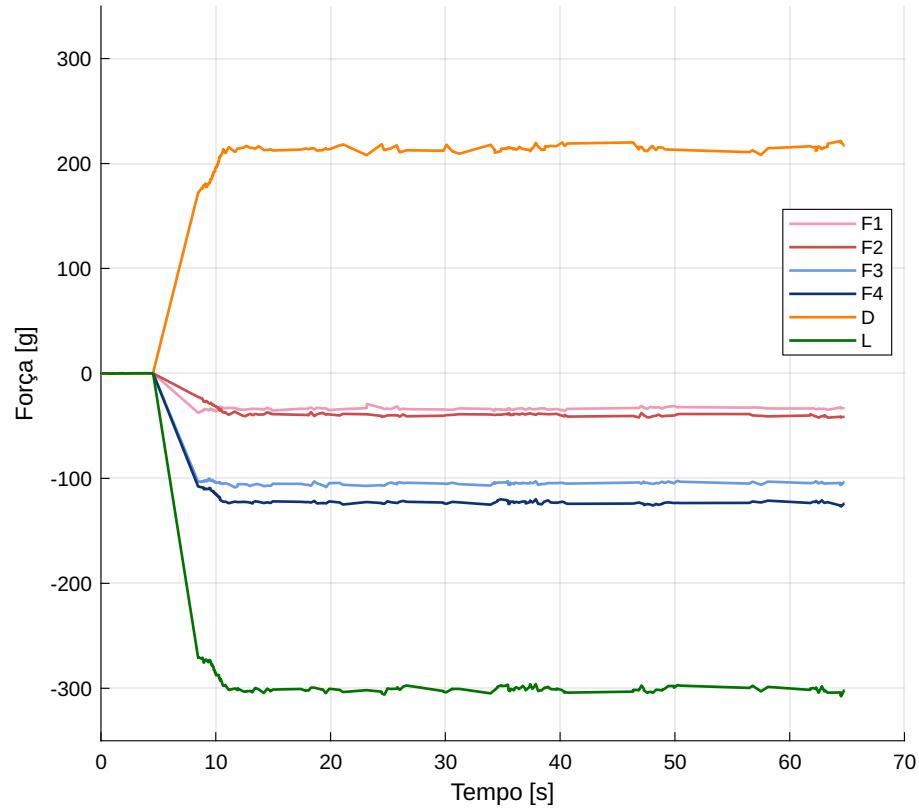


Figura 59 – Forças medidas durante o ensaio do modelo com pacote aerodinâmico, após a correção da interferência do momento de flexão (Autor).

F1 [g]	F2 [g]	F3 [g]	F4 [g]	D [g]	L [g]
-33,74	-40,06	-106,17	-123,04	213,85	-303,01

Tabela 15 – Valores médios das forças medidas durante o ensaio do modelo com pacote aerodinâmico, após a correção da interferência do momento de flexão (Autor).

A sustentação total L apresenta apenas uma variação discreta, passando de aproximadamente $-307,87$ g para $-303,01$ g, o que confirma que a correção do momento de flexão não altera o equilíbrio global do sistema, mas apenas redistribui as cargas entre as células. Esse comportamento é consistente com a orientação inversa dos sensores na estrutura de montagem (Fig. 29), que faz com que as células registrem sinais opostos conforme são submetidas a estados de tração ou compressão.

Além disso, observa-se que a sustentação negativa (*downforce*) aumenta de forma significativa, apresentando magnitude muito superior ao arrasto gerado. Esse resultado evidencia a eficiência do pacote aerodinâmico em produzir força vertical descendente.

O QR code apresentado na Figura 60 direciona para um GIF acelerado do ensaio em túnel de vento, no qual é possível observar visualmente a flexão do chassi, do assoalho com difusor, da asa dianteira e, de forma particularmente evidente, da asa traseira. Essa

deformação dinâmica evidencia a geração de força descendente, que empurra o veículo para baixo durante o escoamento.



Figura 60 – QR code para acesso ao GIF do ensaio em túnel de vento, evidenciando a flexão estrutural e a geração de força descendente no modelo aerodinâmico (Autor).

As alterações geométricas induzidas pela flexão podem influenciar a resposta aerodinâmica do modelo ao modificar o espaço disponível para o escoamento sob o assoalho, alterar o ângulo de ataque das asas ou modificar a área frontal efetiva do veículo. Em conjunto, esses efeitos contribuem para mudanças no campo de pressões e, consequentemente, nas forças aerodinâmicas medidas durante o experimento.

6.3 Forças e momentos

A Tabela 16 apresenta os valores médios das forças medidas em cada célula de carga para as duas configurações ensaiadas e pós processadas.

Modelo	F1 [g]	F2 [g]	F3 [g]	F4 [g]	F5 [g]	L [g]
FGR E05 (1:8) Sem Aero	36,39	32,46	30,01	27,89	165,47	126,75
FGR E05 (1:8) Com Aero	-33,74	-40,06	-106,17	-123,04	213,85	-303,01

Tabela 16 – Valores médios das forças medidas nas células de carga para as configurações com e sem pacote aerodinâmico.

Observa-se que, na condição *sem pacote aerodinâmico*, todas as forças de sustentação (F_1 a F_4) assumem valores positivos, compatíveis com a ausência de superfícies capazes de gerar *downforce*. Por outro lado, quando o pacote aerodinâmico é instalado, verifica-se uma mudança significativa no comportamento das forças. Todas as leituras de sustentação tornam-se negativas, indicando geração expressiva de *downforce*. As células

frontais (F_3 e F_4) registram valores mais intensos, o que é consistente com os resultados obtidos em CFD (Tabela 4). A sustentação total passa de um valor positivo para $L = -303,01$ g, evidenciando um aumento considerável da força descendente. Além disso, a força de arrasto aumenta de 165,47 g para 213,85 g, comportamento esperado por conta do aumento da área frontal, devido ao acréscimo de superfícies expostas ao escoamento.

A Tabela 17 apresenta os momentos de arfagem (p) e de rolagem (r) calculados a partir das forças medidas nas células de carga, permitindo avaliar como a distribuição das cargas verticais varia entre os dois cenários ensaiados: com e sem o pacote aerodinâmico instalado.

Modelo	p [N · mm]	r [N · mm]
FGR E05 (1:8) Sem Aero	10,24	-1,39
FGR E05 (1:8) Com Aero	145,30	8,08

Tabela 17 – Momentos de arfagem (p) e rolagem (r) calculados a partir das forças medidas, para as configurações com e sem pacote aerodinâmico.

Os resultados evidenciam diferenças substanciais entre as duas configurações. No modelo *sem pacote aerodinâmico*, os momentos de arfagem e de rolagem apresentam magnitudes reduzidas, indicando uma distribuição praticamente simétrica das cargas tanto no sentido longitudinal quanto lateral. Tal comportamento é esperado, uma vez que, na ausência de superfícies aerodinâmicas, o escoamento produz carregamentos quase uniformes sobre o protótipo.

Com a instalação do pacote aerodinâmico, ambos os momentos apresentam aumentos expressivos. O momento de arfagem evidencia um deslocamento do centro de pressão e uma maior concentração de carga sobre o eixo dianteiro. De forma similar, o momento de rolagem, indica uma leve assimetria lateral. Essa assimetria pode estar associada principalmente a pequenas imprecisões nas medições das células de carga e, em menor grau, a desvios geométricos do protótipo decorrentes do processo de fabricação e montagem.

6.4 Comparação entre CFD e Ensaio Experimentais

A Tabela 18 apresenta os valores das forças aerodinâmicas de arrasto (D) e sustentação (L), obtidos por meio de simulações numéricas (CFD) e medições experimentais em túnel de vento para o modelo FGR E05 em escala 1:8. A Figura 61 corresponde à representação gráfica desses mesmos resultados, permitindo uma visualização direta e comparativa das forças aerodinâmicas listadas na tabela.

De modo geral, observa-se uma concordância qualitativa entre as tendências previstas numericamente e os resultados experimentais, especialmente no que se refere ao

aumento do arrasto e à geração de sustentação negativa (*downforce*) na configuração com pacote aerodinâmico, bem como à redução dessas forças na configuração sem pacote.

Modelo	$D[g]$	$L[g]$	L/D
FGR E05 (1:8) Com Aero (CFD)	229,6	-379,0	-1,65
FGR E05 (1:8) Com Aero (Experimental)	213,85	-303,01	-1,42
FGR E05 (1:8) Sem Aero (CFD)	165,5	53,28	0,32
FGR E05 (1:8) Sem Aero (Experimental)	165,47	126,75	0,77

Tabela 18 – Comparação entre as forças aerodinâmicas obtidas numericamente (CFD) e experimentalmente (Túnel de vento) a 60 Km/h (16,67 m/s).

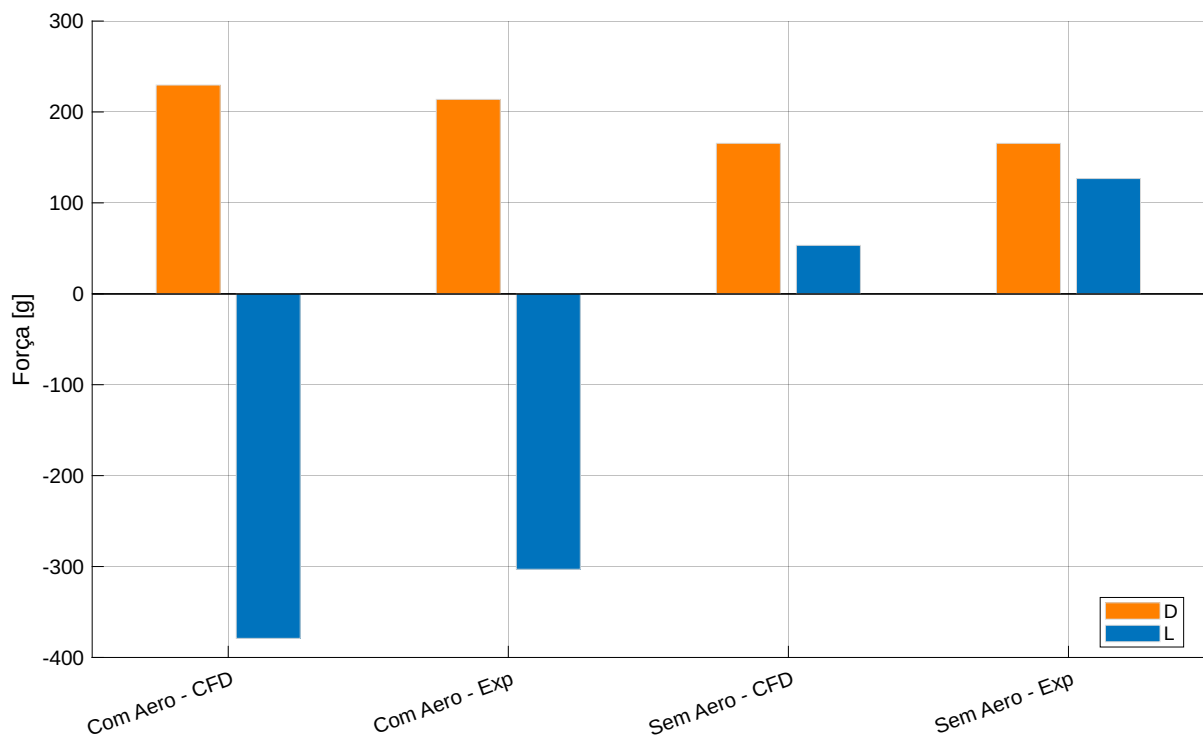


Figura 61 – Comparação entre as forças aerodinâmicas obtidas por simulação numérica (CFD) e por ensaios experimentais em túnel de vento para o modelo FGR E05 em escala 1:8, nas configurações com e sem pacote aerodinâmico, a 60 km/h (16,67 m/s). (Autor).

Para o modelo com pacote aerodinâmico, ambos os métodos indicam geração significativa de *downforce* e aumento proporcional do arrasto, embora os valores experimentais apresentem magnitudes ligeiramente menores, resultado esperado devido a efeitos de escala, limitações do modelo físico e imprecisões inerentes ao ensaio. A razão L/D experimental mantém-se próxima da razão prevista em CFD, indicando boa reprodução do equilíbrio aerodinâmico global.

No caso sem aerodinâmica, observa-se excelente concordância entre CFD e experimento para a força de arrasto, enquanto a sustentação medida no túnel de vento apresenta valores superiores aos previstos numericamente. Essas diferenças podem estar associadas a efeitos do suporte, pequenas variações de alinhamento ou particularidades geométricas não representadas no modelo computacional. Um fator adicional de relevância é que, após os ensaios, verificou-se que a malha utilizada no CFD para o modelo *sem pacote aerodinâmico* havia sido gerada sem o assoalho, ao passo que o experimento foi realizado com o assoalho instalado. Essa inconsistência geométrica altera o escoamento na região inferior do veículo e pode explicar a maior discrepância observada na sustentação para essa condição.

7 Conclusão

7.1 Principais conclusões

O objetivo central deste trabalho foi estabelecer uma relação de retroalimentação entre simulações numéricas em CFD e ensaios em túnel de vento, de modo a validar experimentalmente o desempenho de dispositivos aerodinâmicos projetados para um veículo Fórmula SAE. Para isso, foi desenvolvido um pacote aerodinâmico completo em ambiente CAD, realizadas simulações numéricas com diferentes estratégias de adaptação do número de Reynolds, construída uma bancada de forças dedicada e fabricados modelos físicos em escala 1:8 por manufatura aditiva.

Os resultados numéricos obtidos para o veículo em escala real indicaram que a instalação do pacote aerodinâmico proporcionou um aumento expressivo do *downforce* e uma redução do tempo de volta, evidenciando a eficácia do conjunto aerodinâmico. Ao adaptar as condições de contorno e simplificar a geometria para o modelo em escala 1:8, de modo a permitir a comparação direta com os ensaios experimentais, observou-se a mesma tendência geral. O modelo equipado com aerodinâmica apresentou coeficiente de sustentação mais negativo e maior arrasto em comparação à configuração sem aero. Esses resultados confirmam que o pacote aerodinâmico foi efetivo em converter o veículo, com uma configuração dominada pela força descendente.

Nos ensaios em túnel de vento, a comparação entre os resultados numéricos e experimentais mostrou boa concordância qualitativa. Para o modelo com pacote aerodinâmico, tanto o CFD quanto o experimento apontaram para a geração expressiva de *downforce* acompanhada de aumento de arrasto, com valores experimentais de L e D ligeiramente menores em módulo do que os previstos numericamente, e uma razão L/D experimental próxima da obtida em CFD, indicando boa reprodução do equilíbrio aerodinâmico global. No caso sem aerodinâmica, observou-se excelente concordância para o arrasto, enquanto a sustentação medida no túnel de vento foi maior do que a prevista numericamente.

Outro resultado relevante foi a validação da metodologia de medição de forças. A bancada desenvolvida, composta por cinco células de carga do tipo *single-point*, módulos HX711, microcontrolador Arduino e um *logger* em Python, mostrou operação estável, baixa deriva pós-calibração e boa repetibilidade das leituras. Foram estabelecidos procedimentos sistemáticos de calibração, integração *firmware*-PC e registro em formato CSV, com comandos dedicados para controle da taxa de amostragem, início e fim de aquisição e salvamento/carregamento de parâmetros de calibração, garantindo rastreabilidade e sincronismo dos dados adquiridos.

O estudo também evidenciou a importância do tratamento do acoplamento entre as componentes de sustentação e arrasto. A caracterização do momento de flexão induzido pela força de arrasto nas hastes de suporte, demonstraram que esse efeito pode afetar de forma significativa a leitura das células de sustentação. Ainda que, neste trabalho, a compensação tenha sido aplicada predominantemente em pós-processamento, a estratégia adotada permitiu reduzir a interferência cruzada e obter distribuições de forças mais consistentes com o comportamento físico esperado.

À luz dos objetivos estabelecidos na Seção 1.2, verifica-se que todos foram integralmente cumpridos. Foram realizadas simulações computacionais em CFD com o propósito de comparar os resultados numéricos aos dados experimentais obtidos em túnel de vento; o desempenho do veículo com e sem o pacote aerodinâmico foi comparado, incluindo a avaliação do impacto no tempo de volta a partir dos coeficientes aerodinâmicos obtidos; modelos físicos em escala reduzida do veículo FSAE foram fabricados por manufatura aditiva e empregados nos ensaios; uma bancada experimental específica para uso em túnel de vento foi projetada, construída e instrumentada para medir forças aerodinâmicas e momentos no modelo com e sem pacote aerodinâmico; por fim, os resultados experimentais foram ensaiados, processados e analisados, permitindo evidenciar as contribuições dos dispositivos aerodinâmicos para o desempenho do veículo, bem como estabelecer a correlação entre os dados experimentais e os resultados numéricos.

7.2 Limitações do estudo

Este trabalho apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação de suas conclusões, especialmente no que se refere à comparação aerodinâmica entre o modelo em escala 1:8 e o veículo em escala real. O túnel de vento de circuito aberto empregado não permite a reprodução exata do número de Reynolds correspondente às condições reais de operação, o que impede uma comparação direta do escoamento em escala real no âmbito experimental.

As simulações em CFD foram feitas também para mitigar essa limitação, ao considerar números de Reynolds tanto em escala real, quanto em escala reduzida, utilizada nos ensaios experimentais. A concordância observada entre os resultados experimentais e numéricos nessas condições indica que o modelo computacional adotado é representativo do escoamento em escala reduzida. Assim, a semelhança observada entre os resultados experimentais e numéricos em escala reduzida constitui um indicativo de que o modelo numérico adotado é capaz de representar adequadamente o escoamento nessas condições. Contudo, devido a impossibilidade de reprodução experimental do número de Reynolds em escala real, não é possível concluir de forma definitiva que o modelo mantenha a mesma validade para valores de Reynolds próximos aos de operação real. Ainda assim, a

boa representatividade do modelo numérico em escala reduzida, quando comparada aos resultados experimentais, fornece indícios consistentes de que o modelo computacional apresenta convergência adequada e confiabilidade para a análise do escoamento em escala real.

Outra limitação importante está associada às diferenças geométricas e de contorno entre os modelos numérico e experimental. No modelo físico, estão presentes elementos como suportes, hastes, rugosidade do piso e pequenas imperfeições de fabricação e montagem, enquanto a geometria usada no CFD é idealizada e, em alguns casos, utiliza simplificações (como ausência de certos detalhes e tratamento idealizado do piso). Em particular, verificou-se que, em uma das versões de malha para o caso sem pacote aerodinâmico, o assoalho não foi incluído, ao passo que o protótipo ensaiado no túnel de vento mantinha essa superfície instalada, modificando o escoamento na região inferior do veículo e contribuindo para a discrepância observada na sustentação experimental nessa condição.

Além disso, algumas simplificações foram adotadas nas condições de contorno das simulações numéricas para aproximá-las às limitações do ensaio experimental. Não foi considerada a rotação das rodas via MRF, e o solo foi tratado como estacionário, sem a implementação de solo móvel. Essas escolhas visam alinhar o modelo numérico à realidade do túnel de vento, mas afastam ambas as abordagens das condições ideais de operação em pista.

No âmbito experimental, a própria configuração da bancada de forças impõe restrições. O acoplamento entre as leituras de sustentação e arrasto, decorrente do momento de flexão transmitido pelas hastes, foi mitigado por meio de caracterização específica e correções em pós-processamento, mas não totalmente eliminado. A estrutura da bancada, as tolerâncias das células de carga, o processo de calibração e as limitações da resolução dos sensores introduzem incertezas adicionais. Soma-se a isso o fato de que a matriz de ensaios foi restrita a uma velocidade característica (60 km/h), a um único ajuste de altura do modelo e a condições sem ângulo de deriva, o que limita a abrangência dos resultados frente ao espectro completo de operação do veículo em pista.

7.3 Recomendações para trabalhos futuros

Tendo em vista os avanços alcançados e as limitações identificadas, diversas possibilidades de continuidade se apresentam. Uma primeira recomendação é a ampliação da campanha experimental, incluindo um conjunto mais abrangente de velocidades, diferentes alturas de rodagem e variação do ângulo de deriva do escoamento. Essa ampliação permitiria construir mapas aerodinâmicos mais completos, contemplando o comportamento do veículo em situações representativas de aceleração, frenagem e curvas de diferentes raios, contribuindo diretamente para estudos de dinâmica veicular.

Do ponto de vista da instrumentação, recomenda-se a evolução da bancada para permitir a aplicação em tempo real das rotinas de compensação (como o MOMCAL operando em modo de ajuste durante o ensaio), bem como a investigação de arquiteturas de medição que reduzam ainda mais o acoplamento entre forças e momentos, por exemplo, o emprego de sensores adicionais dedicados à medição de momentos. A incorporação de técnicas complementares, como medições de pressão superficial, visualização de escoamento com fumaça e análises de incerteza mais detalhadas, também representa um caminho promissor para elevar o nível de confiabilidade dos resultados.

No campo da modelagem numérica, sugerem-se estudos sistemáticos avaliando o impacto da condição de solo móvel, da rotação das rodas e de diferentes modelos de turbulência sobre os coeficientes aerodinâmicos e a distribuição das forças. A integração entre CFD e métodos de otimização, poderia ser explorada para propor novos arranjos de asas, difusores e carenagens, buscando maximizar a razão L/D em cenários específicos de prova.

Por fim, recomenda-se que a metodologia desenvolvida neste trabalho seja incorporada de forma contínua ao processo de projeto aerodinâmico de veículos de competição. Embora o estudo de caso tenha sido conduzido com um veículo *Fórmula SAE*, os procedimentos de modelagem em CFD, prototipagem rápida, ensaios em túnel de vento e análise das forças aerodinâmicas são gerais e podem ser adaptados a diferentes categorias e arquiteturas veiculares. A utilização conjunta dessas etapas, complementada futuramente por medições em pista instrumentada, tem potencial para consolidar um processo de desenvolvimento aerodinâmico mais robusto, reduzindo incertezas de projeto e promovendo ganhos consistentes de desempenho em uma ampla gama de veículos de competição.

Referências

- ANDERSON, J. D. *Fundamentals of Aerodynamics*. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2010. Citado 5 vezes nas páginas 21, 26, 27, 28 e 29.
- ANSYS Inc. *ANSYS Fluent Theory Guide*. Release 2023 r1. Canonsburg, PA, 2023. Disponível via licença acadêmica ANSYS. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 56.
- ARABACI, S. K.; DILBAZ, F. Aerodynamic analysis of anka uav and heron uav. Marmaris, Turkey, April 2019. Manisa Celal Bayar University, Department of Mechanical Engineering, Manisa/Turkey. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 51.
- BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. *Low-Speed Wind Tunnel Testing*. 3rd. ed. New York: Wiley, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 23, 38, 39, 40 e 64.
- BLAZEK, J. *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. 3rd. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN 9780080999951. Citado na página 56.
- BUENO, D. *Desenvolvimento de uma Balança Tipo Plataforma com Suportes Retrátéis*. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria. Accessed: 2025-05-31. Citado na página 41.
- CENTER, N. G. R. *Aerodynamic Center*. 2020. Acessado em 31 de maio de 2025. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/ac.html>>. Citado na página 30.
- CENTER, N. G. R. *Center of Pressure*. 2020. Acessado em 31 de maio de 2025. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/VirtualAero/BottleRocket/airplane/cp.html>>. Citado na página 30.
- COLUNA, P. *Porpoising: o novo (velho) problema da F1 2022*. Terra, 2022. Acessado em 22 de junho de 2025. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/parceiros/parabolica/porpoising-o-novo-velho-problema-da-f1-2022,ab78a0f39b56f1c697cc8b983736975ai50tnhr5.html>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 31.
- DAHLBERG, H. *Aerodynamic Development of Formula Student Race Car*. 31 p. Dissertação (Master's thesis) — KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 37.
- FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 3rd. ed. Berlin: Springer, 2002. ISBN 9783540420743. Citado na página 55.
- Georgia Tech Motorsports. *Aerodynamics*. n.d. Accessed: 2025-06-22. Disponível em: <<https://www.gtms.gatech.edu/aerodynamics>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 34.
- GUPTA, S.; SAXENA, K. Análise aerodinâmica de um carro de fórmula sae. In: *13ª Conferência Internacional sobre Transferência de Calor, Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica*. Portoroz, Eslovênia: HEFAT, 2017. Artigos apresentados na conferência de 17 a 19 de julho de 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2263/62356>>. Citado na página 25.

- HBM — Hottinger Brüel & Kjær. *Como uma célula de carga trabalha?* n.d. Acesso em: 02 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/6768/como-uma-celula-de-carga-trabalha/>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 75.
- HUCHO, W.-H. *Aerodynamics of Road Vehicles*. 4. ed. [S.l.]: SAE International, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 31 e 35.
- HUFNAGEL, J. *Wind Tunnel Force Balance Designs*. 2022. Technical Report. Accessed: 2025-05-31. Citado na página 41.
- JADHAV, M. *Formula Student's Diffuser and Undertray*. 2020. <<https://grabcad.com/library/formula-student-s-diffuser-and-undertray-1>>. GrabCAD Library model. Accessed: 2025-06-22. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 35.
- KATZ, J. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. [S.l.]: Bentley Publishers, 2016. Citado 19 vezes nas páginas 8, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 41, 42 e 43.
- KOGAPPA, A. *Formula Wing Modeller (FWM)*. n.d. <<https://kogappa.com/projects/fwm/>>. Accessed: 2025-06-22. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 33.
- LAD, S. et al. Study of drag around the nosecone of fsae vehicle. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, IRJET, v. 7, n. 12, p. 2078–2082, dez. 2020. ISSN 2395-0056. ISO 9001:2008 Certified Journal | Impact Factor: 7.529. Disponível em: <<https://www.irjet.net/archives/V7/i12/IRJET-V7I12349.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 32.
- LARSEN, A. L. *Aerodynamic validation of a Formula Student race car*. Dissertação (Master's thesis) — Department of Energy and Environmental Engineering, June 2021. Citado na página 23.
- LOPEZ, M. C. *Front Wing for a FSAE Car (2017)*. 2017. LinkedIn Pulse article. Accessed: 2025-06-22. Disponível em: <<https://www.linkedin.com/pulse/front-wing-fsae-car-2017-mario-carioni-lopez/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 33.
- Ludemann Engineering. *Posts tagged with "Undertray"*. n.d. Accessed: 2025-06-22. Disponível em: <<https://ludemannengineering.com/tag/undertray/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 35.
- MENDES, R. C. F. *Interação entre esteiras aerodinâmicas de turbinas de eixo horizontal em arranjos*. 163 p. Tese (Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas)) — Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 9, 67 e 68.
- MENTER, F.; LECHNER, R.; MATYUSHENKO, A. *Best Practice: Generalized k-(GEKO) Two-Equation Turbulence Modeling in Ansys CFD*. [S.l.], 2021. NTS, St. Petersburg, Russia. Citado na página 55.
- MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. *Race Car Vehicle Dynamics*. [S.l.]: SAE International, 1995. Citado 5 vezes nas páginas 21, 25, 29, 30 e 32.
- MONTES, P. L. *Estudo Aerodinâmico de um Minifoguete Experimental*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) — Universidade de Brasília - UnB, Faculdade UnB Gama - FGA, Brasília, DF, 2023. Citado na página 78.

- NASA. *Closed Return Wind Tunnel*. 2022. <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuncret.html>>. Acesso em: 05 dez. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 40.
- NASA. *Open Return Wind Tunnel*. 2022. <<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>>. Acesso em: 05 dez. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 39.
- NECULA, B. *HX711 Arduino Library*. 2014. Disponível sob licença MIT. Acesso em: 02 nov. 2025. Disponível em: <<https://github.com/bogde/HX711>>. Citado na página 78.
- OXYZOGLU, I. *Design & Development of an Aerodynamic Package for a FSAE Race Car*. Dissertação (Diploma Thesis) — Laboratory of Fluid Mechanics & Turbomachinery, University of Thessaly, Volos, Greece, maio 2017. Supervisor: Nikolaos Pelekasis. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/160501318.pdf>>. Citado 5 vezes nas páginas 8, 32, 33, 35 e 36.
- PATIL, R. et al. Design analysis of formula student car front wing. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, ESRSA Publications, v. 8, n. 6, p. 518–522, 2019. Disponível em: <<https://www.ijert.org/research/design-analysis-of-formula-student-car-front-wing-IJERTV8IS060079.pdf>>. Citado na página 32.
- ProfElectro. *Aquisição e Tratamento de Dados – Teoria 11: Pontes de Wheatstone*. n.d. Acesso em: 02 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.profelectro.info/aquisicao-e-tratamento-de-dados-%E2%80%93-teoria-11-pontes-de-wheatstone/>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 74.
- RACER, O. *Thinking in Aerodynamic Coefficients*. 2024. Accessed: November 1, 2025. Disponível em: <<https://occamsracers.com/2024/03/22/thinking-in-aerodynamic-coefficients/>>. Citado na página 62.
- SAE International. *Formula SAE Rules*. 2025. <<https://www.fsaeonline.com/>>. Accessed: 2025-05-31. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 43.
- SELIG, M. S. et al. *Summary of Low-Speed Airfoil Data*. Virginia Beach, VA, USA: SoarTech Publications, 1995. v. 1. ISBN 978-0964985514. Citado na página 47.
- SEWARD, D. *Race Car Design*. Lancaster, UK: Palgrave Macmillan, 2014. Emeritus Professor of Engineering Design, Department of Engineering, Lancaster University. Citado 6 vezes nas páginas 8, 30, 31, 32, 33 e 34.
- SOARES, A.; NETO, B.; SILVA, C. *Projeto e Construção de uma Balança de Três Eixos para Túnel de Vento*. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Santa Maria. Accessed: 2025-05-31. Citado na página 41.
- TAYLOR, J. R. *Introdução à Análise de Erros: O Estudo das Incertezas nas Medições Físicas*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. Citado na página 78.
- THAPA, A. *Aerodynamics of Road Vehicles*. Bachelor's Thesis — Satakunta University of Applied Sciences, 2021. Degree Programme in Mechatronics. Citado na página 28.
- U.S. Standard Atmosphere. *U.S. Standard Atmosphere, 1976*. Washington, D.C., 1976. Available at NASA Technical Reports Server (NTRS), Document ID: 19770009539. Disponível em: <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770009539.pdf>>. Citado na página 64.

- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2007. ISBN 9780131274983. Citado na página 22.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd. ed. Harlow: Pearson Education, 2007. ISBN 9780131274983. Citado na página 56.
- WHITE, F. M. *Fluid Mechanics*. 7. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 21, 26 e 30.
- WORDLEY, S.; SAUNDERS, J. Aerodynamics for formula sae: Initial design and performance prediction. In: SAE INTERNATIONAL. *SAE Technical Paper*. [S.l.]: SAE International, 2006. Citado na página 25.
- WRIGHT, J. R.; COOPER, J. E. *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads*. [S.l.]: Wiley, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 29, 36 e 37.
- ZHANG, X.; TOET, W.; ZERIHAN, J. Ground effect aerodynamics of race cars. *Journal of Fluids Engineering*, ASME, v. 127, n. 3, p. pp. 367–378, 2006. Citado na página 22.
- ztikmaenn. *Comment on “Gallery bneIY”*. 2015. Accessed: 2025-06-22. Disponível em: <<https://imgur.com/gallery/bneIY/comment/487396487>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 34.

Appendices

8 Firmware em C

```

1  #include <HX711.h>
2  #include <EEPROM.h>
3  #include <math.h>
4
5  // Forward declarations of globals used
6  extern unsigned long t0;
7  extern unsigned long lastTick;
8
9  // ===== PINOS =====
10 const byte DT[5]      = {2, 4, 6, 8, 10};
11 const byte SCKHX[5]   = {3, 5, 7, 9, 11};
12
13 // ===== OBJETOS =====
14 HX711 sc[5];
15
16 // ===== CONFIG =====
17 unsigned long sampleIntervalMs = 100; // intervalo do STREAM (ms)
18 int          avgCal    = 10;          // media so para CAL
19 bool         streaming=false, plotMode=false, csvMode=false;
20
21 // ===== ESTADO ESCALA =====
22 float scaleFactor[5] = {1,1,1,1,1};
23 long  offsetRaw[5]   = {0,0,0,0,0};
24 float knownWeight[5] = {0,0,0,0,0};
25 bool  cell_ok[5]     = {true,true,true,true,true};
26
27 // ===== Momento =====
28 bool  momApply=false, momAdapt=false; // momAdapt = aplica (a,b)
29 float momSlope[4] = {0,0,0,0};      // a_i
30 float momInter[4] = {0,0,0,0};      // b_i
31 uint16_t momN=0; unsigned long momTms=0; bool momCsv=false;
32
33 // ===== Buffers de leitura nao-bloqueante =====
34 float lastGood[5]      = {NAN,NAN,NAN,NAN,NAN};
35 unsigned long lastUpdMs[5] = {0,0,0,0,0};
36 const unsigned long STALE_MS = 2000; // marca inativa se >2s sem
    atualizar
37
38 // ===== Serial Parser =====
39 String cmdBuf; unsigned long lastCharTime=0; const unsigned long
    CMD_IDLE_MS=150;
40
41 // ===== Sinalizacao para script do PC =====

```

```

42 bool    hostLogSignal=false;    // PCLOG ON/OFF
43 String hostLogName="run";      // nome logico do log (apenas marcador no
    Serial)
44
45 // ===== EEPROM =====
46 struct PersistData{
47     uint32_t magic;             // 0xC0FFEEB9
48     float    scale[5];
49     long     offs[5];
50     uint8_t  flags;             // bit0: momApply, bit1: momAdapt
51     float    momSlope[4];
52     float    momInter[4];
53     uint16_t crc;
54 };
55 const uint32_t MAGIC=0xC0FFEEB9;
56 const int EEPROM_ADDR=0;
57
58 uint16_t crc16_update(uint16_t crc, uint8_t a){ crc^=a; for(int
    i=0;i<8;i++) crc=(crc&1)?(crc>>1)^0xA001:(crc>>1); return crc; }
59 uint16_t calcCRC(const PersistData &p){ const uint8_t* b=(const
    uint8_t*)&p; size_t n=sizeof(PersistData)-sizeof(uint16_t); uint16_t
    crc=0xFFFF; for(size_t i=0;i<n;i++) crc=crc16_update(crc,b[i]);
    return crc; }
60 void saveEEPROM(){
61     PersistData p; p.magic=MAGIC;
62     for(int i=0;i<5;i++){ p.scale[i]=scaleFactor[i];
        p.offs[i]=offsetRaw[i]; }
63     p.flags=0; if(momApply) p.flags|=0x01; if(momAdapt) p.flags|=0x02;
64     for(int i=0;i<4;i++){ p.momSlope[i]=momSlope[i];
        p.momInter[i]=momInter[i]; }
65     p.crc=calcCRC(p); EEPROM.put(EEPROM_ADDR,p);
66     Serial.println(F("[OK] EEPROM salva."));
67 }
68 bool loadEEPROM(){
69     PersistData p; EEPROM.get(EEPROM_ADDR,p);
70     if(p.magic!=MAGIC || calcCRC(p)!=p.crc) return false;
71     for(int i=0;i<5;i++){ scaleFactor[i]=p.scale[i];
        offsetRaw[i]=p.offs[i]; }
72     momApply=(p.flags&0x01)!=0; momAdapt=(p.flags&0x02)!=0;
73     for(int i=0;i<4;i++){ momSlope[i]=p.momSlope[i];
        momInter[i]=p.momInter[i]; }
74     Serial.println(F("[OK] EEPROM carregada."));
75     return true;
76 }
77 void applyScaleOffsets(){ for(int i=0;i<5;i++){
    sc[i].set_scale(scaleFactor[i]); sc[i].set_offset(offsetRaw[i]); }}
78

```

```

79 // ===== Utils =====
80 int idxFromStr(const String &s){ if(!s.length()) return -1; int
    k=s.toInt(); return (k>=1&&k<=5)?k-1:-1; }
81 void printVal3(float x){ if(isnan(x)) Serial.print(F("NA")); else
    Serial.print(x,3); }
82 void printVal5(float x){ if(isnan(x)) Serial.print(F("0")); else
    Serial.print(x,5); }
83 bool isValidMomCal(){ for(int i=0;i<4;i++)
    if(isfinite(momSlope[i])&&isfinite
84 (momInter[i])&&(momSlope[i]!=0||momInter[i]!=0)) return true; return
    false; }
85
86 bool waitReadyTimeout(int i, unsigned long to_ms){ unsigned long
    t0=millis(); while(!sc[i].is_ready()){ if(millis()-t0>to_ms) return
    false; delay(1);} return true; }
87
88 // ===== Leitura NAO-BLOQUEANTE =====
89 inline void pollOne(int i){
90     if(!cell_ok[i]) return;
91     if(sc[i].is_ready()){
92         float v=sc[i].get_units(1);
93         if(isfinite(v)){ lastGood[i]=v; lastUpdMs[i]=millis(); }
94     }
95     if(millis()-lastUpdMs[i] > STALE_MS) cell_ok[i]=false;
96 }
97 void pollAll(){ for(int i=0;i<5;i++) pollOne(i); }
98
99 // Semeia leituras boas no boot/LOAD/CAL
100 void primeReadAll(unsigned long to_ms_per_cell=800){
101     for(int i=0;i<5;i++){
102         if(waitReadyTimeout(i,to_ms_per_cell)){
103             float v=sc[i].get_units(1);
104             lastGood[i]=v; lastUpdMs[i]=millis(); cell_ok[i]=true;
105         } else {
106             cell_ok[i]=false;
107             Serial.print(F("[WARN] C")); Serial.print(i+1);
108             Serial.println(F(" sem resposta no primeRead."));
109         }
110     }
111 }
112 // Pequeno burst para atualizar antes de um READ
113 void burstPollMs(unsigned long ms){ unsigned long t0=millis();
    while((millis()-t0)<ms){ pollAll(); delay(1);} }
114
115 // ===== Saida corrigida (aplica MOM e FLIP em runtime se momAdapt)
    =====

```

```

116 void computeOutputs(float &F1,float &F2,float &F3,float &F4,float
    &D,float &L){
117     float v[5]; for(int i=0;i<5;i++) v[i]=lastGood[i];
118     bool apply = momApply || momAdapt;
119     float out[4];
120     if(apply){
121         float Dnow=v[4];
122         for(int i=0;i<4;i++){
123             float base=v[i];
124             if(isfinite(base)&&isfinite(Dnow)) out[i]=base -
                (momSlope[i]*Dnow + momInter[i]);
125             else out[i]=base;
126             if(momAdapt && isfinite(out[i])) out[i] = out[i]; // FLIP runtime
                F1..F4 //No FLIP at now
127         }
128     } else {
129         for(int i=0;i<4;i++) out[i]=v[i];
130     }
131     F1=out[0]; F2=out[1]; F3=out[2]; F4=out[3]; D=v[4];
132     L=0; if(!isnan(out[0])) L+=out[0]; if(!isnan(out[1])) L+=out[1];
        if(!isnan(out[2])) L+=out[2]; if(!isnan(out[3])) L+=out[3];
133 }
134
135 // ===== MOMCAL helpers (nao-bloqueante) =====
136 static bool readInstantAll_window(float &f1,float &f2,float &f3,float
    &f4,float &d, unsigned long window_ms){
137     unsigned long t0 = millis();
138     float tmp[5] = {NAN,NAN,NAN,NAN,NAN};
139     bool gotD = false;
140     while ((millis() - t0) < window_ms && !gotD) {
141         if (sc[4].is_ready()) { tmp[4] = sc[4].get_units(1); gotD = true; }
142         for (int i=0;i<4;i++) if (isnan(tmp[i]) && sc[i].is_ready()) tmp[i]
            = sc[i].get_units(1);
143         delay(1);
144     }
145     for (int i=0;i<4;i++) if (isnan(tmp[i]) && sc[i].is_ready()) tmp[i] =
        sc[i].get_units(1);
146     f1=tmp[0]; f2=tmp[1]; f3=tmp[2]; f4=tmp[3]; d=tmp[4];
147     return gotD;
148 }
149
150 void doMomentCalibration(unsigned long t_ms, uint16_t N){
151     if (N < 5) N = 5; if (t_ms < 50) t_ms = 50;
152     unsigned long dt = t_ms / N; if (dt < 5) dt = 5;
153
154     bool wasStreaming = streaming; streaming = false;
155     bool wasAdapt      = momAdapt; momAdapt      = false;

```

```

156
157     uint16_t n[4] = {0,0,0,0};
158     double meanD[4] = {0,0,0,0};
159     double meanF[4] = {0,0,0,0};
160     double Sxx[4] = {0,0,0,0};
161     double Sxy[4] = {0,0,0,0};
162
163     unsigned long tStart = millis();
164     if (momCsv) Serial.println(F("t,F1,F2,F3,F4,D"));
165
166     for (uint16_t k = 0; k < N; ++k) {
167         unsigned long tSampleStart = millis();
168         unsigned long tGoal = tSampleStart + dt;
169
170         unsigned long win = dt/2; if (win > 120) win = 120; if (win < 20)
            win = 20;
171
172         float f1,f2,f3,f4,d;
173         bool gotD = readInstantAll_window(f1,f2,f3,f4,d, win);
174
175         if (momCsv) {
176             float tsec = (millis() - tStart)/1000.0f;
177             Serial.print(tsec,3); Serial.print(',');
178             float ff[4]={f1,f2,f3,f4};
179             for (int i=0;i<4;i++){ if (isnan(ff[i])||!isfinite(ff[i]))
                Serial.print(""); else Serial.print(ff[i],5);
                Serial.print(','); }
180             if (isnan(d)||!isfinite(d)) Serial.println(""); else
                Serial.println(d,5);
181         }
182
183         if (gotD && isfinite(d)) {
184             float ff[4] = {f1,f2,f3,f4};
185             for (int i=0;i<4;i++) if (!isnan(ff[i]) && isfinite(ff[i])) {
186                 n[i]++;
187                 double Di_prevMean = meanD[i];
188                 double Fi_prevMean = meanF[i];
189                 meanD[i] += (((double)d) - meanD[i]) / (double)n[i];
190                 meanF[i] += (((double)ff[i]) - meanF[i]) / (double)n[i];
191                 double dD = ((double)d) - Di_prevMean;
192                 double dF = ((double)ff[i]) - Fi_prevMean;
193                 Sxx[i] += dD * ( ((double)d) - meanD[i] );
194                 Sxy[i] += dD * ( ((double)ff[i]) - meanF[i] );
195             }
196         }
197
198         while ((long)(tGoal - millis()) > 0) { pollAll(); delay(1); }

```

```

199     }
200
201     momTms = t_ms; uint16_t minN = 0xFFFF;
202     Serial.println(F("==== MOMCAL resultado (robusta) ====="));
203     for (int i=0;i<4;i++) {
204         if (n[i] < minN) minN = n[i];
205         const double VAR_EPS = 1e-6;
206         if (n[i] < 5 || fabs(Sxx[i]) < VAR_EPS) {
207             momSlope[i] = 0.0f; momInter[i] = (float)meanF[i];
208             Serial.print(F("C")); Serial.print(i+1); Serial.println(F(":
                variacao de D insuficiente/poucas amostras -> a=0,
                b=mean(F)"));
209             continue;
210         }
211         double a = Sxy[i] / Sxx[i];
212         double b = meanF[i] - a * meanD[i];
213         if (!isfinite(a) || fabs(a) > 1e3) a = 0.0;
214         if (!isfinite(b) || fabs(b) > 1e5) b = 0.0;
215         momSlope[i] = (float)a; momInter[i] = (float)b;
216         Serial.print(F("C")); Serial.print(i+1); Serial.print(F(": a="));
                Serial.print(momSlope[i],6); Serial.print(F(" b="));
                Serial.println(momInter[i],6);
217     }
218     momN = (minN==0xFFFF ? 0 : minN);
219     Serial.print(F("N(min por canal)=")); Serial.println(momN);
220     Serial.print(F("T(ms)=")); Serial.println(momTms);
221     Serial.println(F("[OK] Use MOMAPPLY ON ou MOMADAPT ON (flip) e SAVE
        para persistir."));
222
223     momAdapt = wasAdapt;
224     streaming = wasStreaming;
225 }
226
227 // ===== HELP / STATUS =====
228 void printHelp(){
229     Serial.println(F("==== Comandos ====="));
230     Serial.println(F("HELP, STATUS"));
231     Serial.println(F("SETWEIGHT <i> <val> | CAL <i>|ALL |
        SETSCALE <i> <val> | SHOWSCALE"));
232     Serial.println(F("FLIP <i>|ALL | TARE <i>|ALL | SCAN
        | ENABLE <i> ON|OFF"));
233     Serial.println(F("MOMCAL <t_ms> <n> | MOMCSV ON|OFF |
        MOMAPPLY ON|OFF | MOMSTATUS"));
234     Serial.println(F("MOMADAPT ON|OFF|STATUS| PLOT ON|OFF | CSV
        ON|OFF | CSVHEADER"));
235     Serial.println(F("PCLOG ON [nome]|OFF -> envia marcadores p/ script
        do PC iniciar/parar log"));

```

```

236     Serial.println(F("READ                                | STREAM ON|OFF          | RATE
        <ms>                                | AVGCAL <n>")));
237 }
238 void printStatus(){
239     Serial.println(F("==== STATUS ===="));
240     Serial.print(F("STREAM: "));
241     Serial.println(streaming?F("ON"):F("OFF"));
242     Serial.print(F("PLOT: "));
243     Serial.println(plotMode?F("ON"):F("OFF"));
244     Serial.print(F("CSV: "));      Serial.println(csvMode?F("ON"):F("OFF"));
245     Serial.print(F("PCLOG: "));    Serial.print(hostLogSignal?F("ON
        (nome=\\"):F("OFF")); if(hostLogSignal){
        Serial.print(hostLogName); Serial.print(F("\\")); }
        Serial.println();
246     Serial.print(F("RATE: "));    Serial.print(sampleIntervalMs);
        Serial.println(F(" ms"));
247     Serial.println(F("Celulas (age):"));
248     for(int i=0;i<5;i++){
249         Serial.print(F(" C")); Serial.print(i+1); Serial.print(F(": "));
250         if(cell_ok[i]){ Serial.print(F("OK, "));
251             Serial.print(millis()-lastUpdMs[i]); Serial.println(F("ms")); }
252         else Serial.println(F("INATIVA"));
253     }
254     Serial.print(F("MOMAPPLY: "));
255     Serial.println(momApply?F("ON"):F("OFF"));
256     Serial.print(F("MOMADAPT: "));
257     Serial.println(momAdapt?F("ON"):F("OFF"));
258     Serial.println(F("Momento (a_i, b_i):"));
259     for(int i=0;i<4;i++){ Serial.print(F(" C")); Serial.print(i+1);
260         Serial.print(F(": a=")); Serial.print(momSlope[i],6);
261         Serial.print(F(" b=")); Serial.println(momInter[i],6);}
262     Serial.print(F("MOM N(min)=")); Serial.print(momN); Serial.print(F("
        T(ms)=")); Serial.println(momTms);
263     Serial.println(F("====="));
264 }
265
266 // ===== SERIAL =====
267 void handleCommand(String line);
268 void readAndDispatchSerial(){
269     while(Serial.available()){
270         char c=(char)Serial.read();
271         if(c=='\r' || c=='\n'){
272             if(cmdBuf.length(>0){ String line=cmdBuf; cmdBuf="";
273                 handleCommand(line); }
274             } else { cmdBuf+=c; lastCharTime=millis(); }
275     }

```

```

268     if(cmdBuf.length()>0 && (millis()-lastCharTime)>CMD_IDLE_MS){ String
        line=cmdBuf; cmdBuf=""; handleCommand(line); }
269 }
270
271 // ===== PARSEER =====
272 void handleCommand(String line){
273     line.trim(); line.toUpperCase(); if(!line.length()) return;
274     int sp=line.indexOf(' '); String
        cmd=(sp<0)?line:line.substring(0,sp); String
        rest=(sp<0)?"":line.substring(sp+1); rest.trim();
275
276     if(cmd=="HELP"){ printHelp(); return; }
277     if(cmd=="STATUS"){ printStatus(); return; }
278
279     if(cmd=="SETWEIGHT"){
280         int s=rest.indexOf(' '); if(s<0){ Serial.println(F("[ERRO]
            SETWEIGHT <i> <valor>")); return; }
281         int i=idxFromStr(rest.substring(0,s)); if(i<0){
            Serial.println(F("[ERRO] i=1..5")); return; }
282         knownWeight[i]=rest.substring(s+1).toFloat();
283         Serial.print(F("[OK] Peso C")); Serial.print(i+1); Serial.print(F("
            = ")); Serial.println(knownWeight[i],6); return;
284     }
285
286     if(cmd=="SETSCALE"){
287         int s=rest.indexOf(' '); if(s<0){ Serial.println(F("[ERRO] SETSCALE
            <i> <valor>")); return; }
288         int i=idxFromStr(rest.substring(0,s)); if(i<0){
            Serial.println(F("[ERRO] i=1..5")); return; }
289         float v=rest.substring(s+1).toFloat(); scaleFactor[i]=v;
            sc[i].set_scale(v);
290         Serial.print(F("[OK] Fator C")); Serial.print(i+1);
            Serial.print(F(" = ")); Serial.println(v,6); return;
291     }
292
293     if(cmd=="SHOWSCALE"){
294         Serial.println(F("=== Fatores (RAW/unidade) ==="));
295         for(int i=0;i<5;i++){ Serial.print(F("C")); Serial.print(i+1);
            Serial.print(F(": ")); Serial.println(scaleFactor[i],6); }
296         return;
297     }
298
299     if(cmd=="CAL"){
300         if(rest=="ALL"){
301             for(int i=0;i<5;i++){
302                 if(knownWeight[i]==0){ Serial.print(F("[AVISO] C"));
                    Serial.print(i+1); Serial.println(F(": peso=0 (ignorado)"));

```



```

        continue; }
303     if(!waitReadyTimeout(i,1000)){ Serial.print(F("[WARN] C"));
        Serial.print(i+1); Serial.println(F(" sem resposta."));
        continue; }
304     long raw=sc[i].get_value(avgCal); float
        factor=(float)raw/knownWeight[i];
305     scaleFactor[i]=factor; sc[i].set_scale(factor);
306     float v=sc[i].get_units(1); lastGood[i]=v;
        lastUpdMs[i]=millis(); cell_ok[i]=true;
307     Serial.print(F("C")); Serial.print(i+1); Serial.print(F("
        RAW=")); Serial.print(raw);
308     Serial.print(F(" Peso=")); Serial.print(knownWeight[i],6);
        Serial.print(F(" -> Fator=")); Serial.println(factor,6);
309 }
310 Serial.println(F("[OK] Use SAVE p/ persistir.")); return;
311 } else {
312     int i=idxFromStr(rest); if(i<0){ Serial.println(F("[ERRO] CAL
        <i>|ALL")); return; }
313     if(knownWeight[i]==0){ Serial.println(F("[ERRO] Defina SETWEIGHT
        antes.")); return; }
314     if(!waitReadyTimeout(i,1000)){ Serial.println(F("[WARN] Celula
        sem resposta.")); return; }
315     long raw=sc[i].get_value(avgCal); float
        factor=(float)raw/knownWeight[i];
316     scaleFactor[i]=factor; sc[i].set_scale(factor);
317     float v=sc[i].get_units(1); lastGood[i]=v; lastUpdMs[i]=millis();
        cell_ok[i]=true;
318     Serial.print(F("C")); Serial.print(i+1); Serial.print(F("
        RAW=")); Serial.print(raw);
319     Serial.print(F(" Peso=")); Serial.print(knownWeight[i],6);
        Serial.print(F(" -> Fator=")); Serial.println(factor,6);
320     Serial.println(F("[OK] Use SAVE p/ EEPROM.")); return;
321 }
322 }
323
324 if(cmd=="FLIP"){
325     if(rest=="ALL"){ for(int i=0;i<5;i++){
        scaleFactor[i]=-scaleFactor[i]; sc[i].set_scale(scaleFactor[i]);
        } Serial.println(F("[OK] FLIP ALL (persistente).")); return; }
326     int i=idxFromStr(rest); if(i<0){ Serial.println(F("[ERRO] FLIP
        <i>|ALL")); return; }
327     scaleFactor[i]=-scaleFactor[i]; sc[i].set_scale(scaleFactor[i]);
328     Serial.print(F("[OK] FLIP C")); Serial.println(i+1); return;
329 }
330
331 if(cmd=="TARE"){
332     if(rest=="ALL"){

```

```

333     for(int i=0;i<5;i++){
334         if(waitReadyTimeout(i,1000)){ sc[i].tare();
            offsetRaw[i]=sc[i].get_offset(); cell_ok[i]=true;
            lastUpdMs[i]=millis(); }
335         else { cell_ok[i]=false; Serial.print(F("[WARN] C"));
            Serial.print(i+1); Serial.println(F(" sem resposta no
            TARE.")); }
336     }
337     primeReadAll(800); Serial.println(F("[OK] TARE ALL.")); return;
338 } else {
339     int i=idxFromStr(rest); if(i<0){ Serial.println(F("[ERRO] TARE
            <i>|ALL")); return; }
340     if(waitReadyTimeout(i,1000)){ sc[i].tare();
            offsetRaw[i]=sc[i].get_offset(); cell_ok[i]=true;
            lastUpdMs[i]=millis(); float v=sc[i].get_units(1);
            lastGood[i]=v; Serial.print(F("[OK] TARE C"));
            Serial.println(i+1); }
341     else { cell_ok[i]=false; Serial.print(F("[WARN] C"));
            Serial.print(i+1); Serial.println(F(" sem resposta.")); }
342     return;
343 }
344 }
345
346 if(cmd=="MOMCAL"){
347     int s=rest.indexOf(' '); if(s<0){ Serial.println(F("[ERRO] MOMCAL
            <t_ms> <n>")); return; }
348     unsigned long tms=(unsigned long)rest.substring(0,s).toInt();
349     uint16_t n=(uint16_t)rest.substring(s+1).toInt(); if(n==0){
            Serial.println(F("[ERRO] n>0")); return; }
350     doMomentCalibration(tms,n); primeReadAll(800); return;
351 }
352
353 if(cmd=="MOMCSV"){
354     if(rest=="ON"){ momCsv=true; Serial.println(F("[OK] MOMCSV ON"));
            return; }
355     if(rest=="OFF"){ momCsv=false; Serial.println(F("[OK] MOMCSV
            OFF")); return; }
356     Serial.println(F("[ERRO] MOMCSV ON|OFF")); return;
357 }
358
359 if(cmd=="MOMAPPLY"){
360     if(rest=="ON"){ momApply=true; Serial.println(F("[OK] MOMAPPLY
            ON")); return; }
361     if(rest=="OFF"){ momApply=false; Serial.println(F("[OK] MOMAPPLY
            OFF")); return; }
362     Serial.println(F("[ERRO] MOMAPPLY ON|OFF")); return;
363 }

```

```

364
365     if(cmd=="MOMSTATUS"){ printStatus(); return; }
366
367     if(cmd=="MOMADAPT"){
368         if(rest=="ON"){ if(!hasValidMomCal()) Serial.println(F("[AVISO]
            Rode MOMCAL antes; (a_i,b_i)=0.")); momAdapt=true;
            momApply=true; Serial.println(F("[OK] MOMADAPT ON: aplica
            (a_i,b_i)")); return; }
369         if(rest=="OFF"){ momAdapt=false; Serial.println(F("[OK] MOMADAPT
            OFF.")); return; }
370         if(rest=="STATUS"){ Serial.print(F("MOMADAPT: "));
            Serial.println(momAdapt?F("ON"):F("OFF")); return; }
371         Serial.println(F("[ERRO] MOMADAPT ON|OFF|STATUS")); return;
372     }
373
374     if(cmd=="PLOT"){ if(rest=="ON"){ plotMode=true;
            Serial.println(F("[OK] PLOT ON")); return; } if(rest=="OFF"){
            plotMode=false; Serial.println(F("[OK] PLOT OFF")); return; }
            Serial.println(F("[ERRO] PLOT ON|OFF")); return; }
375
376     if(cmd=="CSV"){ if(rest=="ON"){ csvMode=true; Serial.println(F("[OK]
            CSV ON")); return; } if(rest=="OFF"){ csvMode=false;
            Serial.println(F("[OK] CSV OFF")); return; }
            Serial.println(F("[ERRO] CSV ON|OFF")); return; }
377     if(cmd=="CSVHEADER"){ Serial.println(F("t,F1,F2,F3,F4,D,L")); return;
            }
378
379     if(cmd=="PCLOG"){
380         if(rest.startsWith("ON")){
381             // Pode vir "ON" ou "ON <nome>"
382             String tail=rest.substring(2); tail.trim(); if(tail.length()>0)
                hostLogName=tail; else hostLogName="run";
383             hostLogSignal=true; t0=0; // reinicia relógio do CSV
384             Serial.print(F("$PCLOG,START,")); Serial.println(hostLogName);
385             Serial.println(F("t,F1,F2,F3,F4,D,L")); // header p/ script
386             csvMode=true; // garante saída em CSV
387             Serial.println(F("[OK] PCLOG ON (inicie o script no PC para
                salvar)."));
388             return;
389         } else if(rest=="OFF"){
390             hostLogSignal=false; Serial.println(F("$PCLOG,STOP"));
                Serial.println(F("[OK] PCLOG OFF.")); return;
391         } else { Serial.println(F("[ERRO] PCLOG ON [nome] | OFF")); return;
            }
392     }
393
394     if(cmd=="SCAN"){

```

```

395     for(int i=0;i<5;i++){
396         bool ready=waitReadyTimeout(i,200);
397         cell_ok[i]=ready; Serial.print(F("C")); Serial.print(i+1);
            Serial.print(F(": "));
398         if(ready){ Serial.println(F("OK")); } else {
            Serial.println(F("NAO PRONTA")); }
399     }
400     return;
401 }
402
403 if(cmd=="ENABLE"){
404     int s=rest.indexOf(' '); if(s<0){ Serial.println(F("[ERRO] ENABLE
        <i> ON|OFF")); return; }
405     int i=idxFromStr(rest.substring(0,s)); String
        sw=rest.substring(s+1);
406     if(i<0){ Serial.println(F("[ERRO] i=1..5")); return; }
407     if(sw=="ON"){ cell_ok[i]=true; lastUpdMs[i]=millis();
        Serial.print(F("[OK] C")); Serial.print(i+1); Serial.println(F("
        habilitada.")); }
408     else if(sw=="OFF"){ cell_ok[i]=false; Serial.print(F("[OK] C"));
        Serial.print(i+1); Serial.println(F(" desabilitada.")); }
409     else Serial.println(F("[ERRO] Use ON ou OFF."));
410     return;
411 }
412
413 if(cmd=="READ"){
414     burstPollMs(60);
415     float F1,F2,F3,F4,D,L; computeOutputs(F1,F2,F3,F4,D,L);
416     Serial.println(F("==== LEITURA ===="));
417     Serial.print(F("F1 (g): ")); printVal3(F1); Serial.println();
418     Serial.print(F("F2 (g): ")); printVal3(F2); Serial.println();
419     Serial.print(F("F3 (g): ")); printVal3(F3); Serial.println();
420     Serial.print(F("F4 (g): ")); printVal3(F4); Serial.println();
421     Serial.print(F("D (g): ")); printVal3(D); Serial.println();
422     Serial.print(F("L (g): ")); printVal3(L); Serial.println();
423     return;
424 }
425
426 if(cmd=="STREAM"){ if(rest=="ON"){ streaming=true;
    Serial.println(F("[OK] STREAM ON")); return; } if(rest=="OFF"){
    streaming=false; Serial.println(F("[OK] STREAM OFF")); return; }
    Serial.println(F("[ERRO] STREAM ON|OFF")); return; }
427
428 if(cmd=="RATE"){ unsigned long ms=rest.toInt(); if(ms<20) ms=20;
    sampleIntervalMs=ms; Serial.print(F("[OK] RATE="));
    Serial.print(sampleIntervalMs); Serial.println(F(" ms")); return; }
429

```

```

430     if(cmd=="AVGCAL"){ int n=rest.toInt(); if(n<1) n=1; avgCal=n;
        Serial.print(F("[OK] AVGCAL=")); Serial.println(avgCal); return; }
431
432     if(cmd=="SAVE"){ saveEEPROM(); return; }
433     if(cmd=="LOAD"){ if(!loadEEPROM()) Serial.println(F("[ERRO] EEPROM
        invalida.")); applyScaleOffsets(); primeReadAll(800); return; }
434
435     Serial.println(F("[ERRO] Comando desconhecido. Digite HELP."));
436 }
437
438 // ===== SETUP / LOOP =====
439 unsigned long lastTick=0, t0=0;
440 void setup(){
441     Serial.begin(115200); Serial.setTimeout(200);
442     for(int i=0;i<5;i++){ sc[i].begin(DT[i],SCKHX[i]);
        sc[i].set_scale(1.0); }
443     if(!loadEEPROM()){
444         Serial.println(F("[INFO] EEPROM vazia/desatualizada. Fazendo TARE
            inicial..."));
445         for(int i=0;i<5;i++){
446             if(waitReadyTimeout(i,1000)){ sc[i].tare();
                offsetRaw[i]=sc[i].get_offset(); cell_ok[i]=true;
                lastUpdMs[i]=millis(); }
447             else { cell_ok[i]=false; Serial.print(F("[WARN] C"));
                Serial.print(i+1); Serial.println(F(" sem resposta no
                    boot.")); }
448         }
449     } else { applyScaleOffsets(); }
450     primeReadAll(800);
451     Serial.println(F("HX711 x5 pronto. Digite HELP."));
452 }
453
454 void loop(){
455     readAndDispatchSerial();
456     pollAll();
457
458     if(streaming && (millis()-lastTick)>=sampleIntervalMs){
459         lastTick=millis();
460         float F1,F2,F3,F4,D,L; computeOutputs(F1,F2,F3,F4,D,L);
461
462         if(plotMode){
463             Serial.print(F("F1:")); printVal5(F1); Serial.print(' ');
464             Serial.print(F("F2:")); printVal5(F2); Serial.print(' ');
465             Serial.print(F("F3:")); printVal5(F3); Serial.print(' ');
466             Serial.print(F("F4:")); printVal5(F4); Serial.print(' ');
467             Serial.print(F("D:")); printVal5(D); Serial.print(' ');
468             Serial.print(F("L:")); printVal5(L); Serial.println();

```

```
469     } else if(csvMode){
470         if(t0==0) t0=millis(); float tsec=(millis()-t0)/1000.0f;
471         Serial.print(tsec,3); Serial.print(',');
472         printVal5(F1); Serial.print(','); printVal5(F2);
473         Serial.print(',');
474         printVal5(F3); Serial.print(','); printVal5(F4);
475         Serial.print(',');
476         printVal5(D); Serial.print(','); printVal5(L); Serial.println();
477     } else {
478         Serial.println(F("==== LEITURA ===="));
479         Serial.print(F("F1 (g): ")); printVal3(F1); Serial.println();
480         Serial.print(F("F2 (g): ")); printVal3(F2); Serial.println();
481         Serial.print(F("F3 (g): ")); printVal3(F3); Serial.println();
482         Serial.print(F("F4 (g): ")); printVal3(F4); Serial.println();
483         Serial.print(F("D (g): ")); printVal3(D); Serial.println();
484         Serial.print(F("L (g): ")); printVal3(L); Serial.println();
485     }
}
```

9 Logger em Python

```

1
2 \begin{lstlisting}
3 # hx711_logger.py
4 import argparse
5 import datetime as dt
6 import re
7 import sys
8 import time
9 import threading
10 import queue
11 import math
12 from pathlib import Path
13 from collections import deque
14
15 import serial
16 from serial.tools import list_ports
17
18 try:
19     import matplotlib.pyplot as plt
20 except Exception:
21     plt = None # habilita plot apenas se matplotlib estiver disponivel
22
23 START_TAG = "$PCLOG,START"
24 STOP_TAG  = "$PCLOG,STOP"
25
26 def send_cmd(ser, cmd: str):
27     ser.write((cmd.strip() + "\n").encode("ascii", errors="ignore"))
28     ser.flush()
29     time.sleep(0.03)
30
31 def sanitize_name(name: str) -> str:
32     return re.sub(r"[^A-Za-z0-9_\-]", "_", name) or "run"
33
34 def ensure_logs_dir(save_in_cwd: bool) -> Path:
35     base = Path.cwd() if save_in_cwd else
36         Path(__file__).resolve().parent
37     out = base / "logs"
38     out.mkdir(exist_ok=True)
39     return out
40
41 def make_filepath(logs_dir: Path, run_name: str) -> Path:
42     ts = dt.datetime.now().strftime("%Y-%m-%d_%H-%M-%S")
43     return logs_dir / f"{ts}_{sanitize_name(run_name)}.csv"

```

```

43
44 def looks_like_csv(line: str) -> bool:
45     # CSV vindo do firmware: "t,F1,F2,F3,F4,D,L" + linhas numericas com
        virgula
46     if not line:
47         return False
48     if line.startswith("t,"):
49         return True
50     if line.startswith(',') or line.startswith('$'):
51         return False
52     return ("," in line)
53
54 def parse_csv_line(line: str):
55     # Espera "t,F1,F2,F3,F4,D,L"
56     parts = [p.strip() for p in line.split(",")]
57     if len(parts) != 7:
58         return None
59     def f(x):
60         if x == "" or x.upper() == "NA":
61             return math.nan
62         try:
63             return float(x)
64         except:
65             return math.nan
66     try:
67         vals = [f(p) for p in parts]
68         if not math.isfinite(vals[0]) or vals[0] < 0:
69             return None
70         return vals # [t, F1, F2, F3, F4, D, L]
71     except:
72         return None
73
74 def format_csv_row(tsec, f1, f2, f3, f4, d, lsum, delim, decsep, tprec,
    vprec):
75     def fmt(x, prec):
76         if x is None or not math.isfinite(x):
77             return "NA"
78         s = f"{x:.{prec}f}"
79         if decsep == ",":
80             s = s.replace(".", ",") # troca decimal para virgula, se
                solicitado
81         return s
82     fields = [
83         fmt(tsec, tprec),
84         fmt(f1, vprec),
85         fmt(f2, vprec),
86         fmt(f3, vprec),

```



```

87         fmt(f4, vprec),
88         fmt(d, vprec),
89         fmt(lsum, vprec),
90     ]
91     return delim.join(fields)
92
93 def stdin_worker(cmd_q: "queue.Queue[str]"):
94     try:
95         while True:
96             line = sys.stdin.readline()
97             if not line:
98                 break
99             cmd_q.put(line.strip())
100 except Exception:
101     pass
102
103 def setup_plot(series_str, window_s):
104     if plt is None:
105         print("[AVISO] matplotlib nao disponivel; rode: pip install
106             matplotlib")
107         return None
108     plt.ion()
109
110     # >>> cores invertidas <<<
111     plt.style.use('dark_background')
112
113     fig, ax = plt.subplots()
114     valid = ["F1", "F2", "F3", "F4", "D", "L"]
115     req = [s.strip().upper() for s in series_str.split(",") if
116         s.strip()]
117     series = [s for s in req if s in valid] or valid
118     lines = {}
119     buffers = {"t": deque()}
120     for s in series:
121         buffers[s] = deque()
122         lines[s] = ax.plot([], [], label=s)[0] # sem cor fixa
123     ax.set_xlabel("t (s)")
124     ax.set_ylabel("Forca (g)")
125     ax.grid(True)
126     ax.legend(loc="best")
127     return {"fig": fig, "ax": ax, "lines": lines, "buffers": buffers,
128         "series": series,
129         "window_s": window_s}
130
131 def update_plot(plot, t_val, vals_dict, refresh_s):
132     if plot is None:
133         return True

```

```

131     fig = plot["fig"]; ax = plot["ax"]; lines = plot["lines"]
132     buffers = plot["buffers"]; series = plot["series"]; window_s =
        plot["window_s"]
133     buffers["t"].append(t_val)
134     for s in series:
135         buffers[s].append(vals_dict.get(s, math.nan))
136     while buffers["t"] and (t_val - buffers["t"][0] > window_s):
137         buffers["t"].popleft()
138         for s in series:
139             if buffers[s]:
140                 buffers[s].popleft()
141     for s in series:
142         lines[s].set_data(buffers["t"], buffers[s])
143     xmin = max(0.0, t_val - window_s)
144     xmax = t_val if t_val > window_s else window_s
145     ax.set_xlim(xmin, xmax)
146     vals_all = []
147     for s in series:
148         vals_all += [v for v in buffers[s] if v == v]
149     if vals_all:
150         vmin = min(vals_all); vmax = max(vals_all)
151         if vmin == vmax:
152             vmin -= 1.0; vmax += 1.0
153         pad = 0.05 * (vmax - vmin)
154         ax.set_ylim(vmin - pad, vmax + pad)
155     plt.pause(refresh_s)
156     return plt.fignum_exists(fig.number)
157
158 def main():
159     ap = argparse.ArgumentParser(description="HX711 CSV logger
        interativo com grafico ao vivo.")
160     ap.add_argument("--port", required=True, help="Porta serial (ex.:
        COM5)")
161     ap.add_argument("--baud", type=int, default=115200, help="Baudrate
        (default: 115200)")
162     ap.add_argument("--name", default="run", help="Nome logico do
        ensaio (arquivo CSV)")
163     ap.add_argument("--rate", type=int, default=None, help="RATE em ms
        (ex.: 50)")
164     ap.add_argument("--auto", action="store_true", help="Liga
        RATE/PCLOG/STREAM automaticamente.")
165     ap.add_argument("--no-interactive", action="store_true",
        help="Desativa leitura de comandos do teclado.")
166     ap.add_argument("--silent", action="store_true", help="Nao ecoa
        dados da serial no console.")
167     ap.add_argument("--save-in-cwd", action="store_true", help="Salva
        CSV no diretorio atual do CMD (CWD).")

```

```

168 # CSV
169 ap.add_argument("--csv-delim", default=";", help="Delimitador ao
    salvar CSV (default: ';'). Use ',' para virgula.")
170 ap.add_argument("--dec-sep", default=".", choices=[".", ","],
171                 help="Separador decimal ao salvar (default: '.').")
172 ap.add_argument("--t-prec", type=int, default=3, help="Casas
    decimais para t (default: 3).")
173 ap.add_argument("--val-prec", type=int, default=5, help="Casas
    decimais para F1..L (default: 5).")
174 # Excel hint: escreve 'sep=<delim>' na linha 1
175 ap.add_argument("--excel-sep-hint", dest="excel_sep_hint",
    action="store_true",
176                 help="Escreve linha 'sep=<delim>' no topo (Excel
    abre em colunas).")
177 ap.add_argument("--no-excel-sep-hint", dest="excel_sep_hint",
    action="store_false",
178                 help="Nao escreve a linha 'sep=<delim>'")
179 ap.set_defaults(excel_sep_hint=True) # ATIVADO por padrao
180 # Plot
181 ap.add_argument("--plot", action="store_true", help="Habilita
    grafico ao vivo.")
182 ap.add_argument("--plot-window", type=float, default=30.0,
    help="Janela de tempo do grafico em s (default: 30).")
183 ap.add_argument("--plot-series", default="F1,F2,F3,F4,D,L",
    help="Series no grafico (ex.: F1,L ou D,L).")
184 ap.add_argument("--plot-refresh", type=float, default=0.05,
    help="Intervalo de atualizacao do grafico em s (default: 0.05).")
185 args = ap.parse_args()
186
187 interactive = not args.no_interactive
188 logs_dir = ensure_logs_dir(args.save_in_cwd)
189
190 try:
191     ser = serial.Serial(args.port, args.baud, timeout=0.5)
192 except serial.SerialException as e:
193     print(f"[ERRO] Nao consegui abrir {args.port}: {e}")
194     print("[DICA] Feche o Serial Monitor/Plotter do Arduino ou
    outros programas que usam a porta.")
195     print("[DICA] Portas disponiveis agora:")
196     for p in list_ports.comports():
197         print("  -", p.device, "-", p.description)
198     sys.exit(1)
199
200 ser.reset_input_buffer()
201 ser.reset_output_buffer()
202 print(f"[INFO] Conectado em {args.port} @ {args.baud}.")
203 if interactive:

```

```

204         print("[INFO] Interativo: digite comandos (ex.: STATUS | RATE
           50 | PCLOG ON teste | STREAM ON).")
205         print("[INFO] Ctrl+C para sair. Use --silent para nao ecoar a
           saida.")
206
207     cmd_q: "queue.Queue[str]" = queue.Queue()
208     if interactive:
209         t = threading.Thread(target=stdin_worker, args=(cmd_q,),
           daemon=True)
210         t.start()
211
212     current_file = None
213     logging_on = False
214     run_name = args.name
215
216     # Plot controlado por STREAM ON/OFF
217     plot = None
218     plotting_enabled = False # so abre ao receber STREAM ON (ou --auto
           enviar)
219
220     warned_plot_format = False
221
222     def open_plot_if_needed():
223         nonlocal plot, plotting_enabled
224         if not args.plot:
225             return
226         if plot is None:
227             plot = setup_plot(args.plot_series, args.plot_window)
228             plotting_enabled = plot is not None
229
230     def close_plot_if_open():
231         nonlocal plot, plotting_enabled
232         if plot is not None and plt is not None:
233             try:
234                 plt.close(plot["fig"])
235             except Exception:
236                 pass
237         plot = None
238         plotting_enabled = False
239
240     try:
241         if args.auto:
242             if args.rate:
243                 send_cmd(ser, f"RATE {args.rate}")
244                 if not args.silent: print(f"[TX] RATE {args.rate}")
245                 send_cmd(ser, f"PCLOG ON {run_name}")
246                 if not args.silent: print(f"[TX] PCLOG ON {run_name}")

```

```
247         # Abre a janela de plot ao iniciar o stream
248         open_plot_if_needed()
249         send_cmd(ser, "STREAM ON")
250         if not args.silent: print(f"[TX] STREAM ON")
251
252     while True:
253         raw = ser.readline()
254         if raw:
255             try:
256                 line = raw.decode("utf-8", errors="ignore").strip()
257             except Exception:
258                 line = raw.decode("latin-1",
259                                   errors="ignore").strip()
260
261             if not args.silent:
262                 print(line)
263
264         # START/STOP controlam o arquivo
265         if line.startswith(START_TAG):
266             parts = line.split(",", 2)
267             if len(parts) >= 3:
268                 run_name = parts[2].strip() or run_name
269             if current_file:
270                 try: current_file.close()
271                 except:
272                     pass
273             filepath = make_filepath(logs_dir, run_name)
274             current_file = open(filepath, "w", newline="",
275                                 encoding="utf-8-sig")
276             logging_on = True
277             if args.excel_sep_hint:
278                 current_file.write(f"sep={args.csv_delim}\n")
279             print(f"[LOG] Iniciado: {filepath}")
280             continue
281
282         if line.startswith(STOP_TAG):
283             if current_file:
284                 try:
285                     current_file.flush()
286                     current_file.close()
287                 except:
288                     pass
289             print("[LOG] Finalizado e arquivo fechado.")
290             current_file = None
291             logging_on = False
292             continue
```

```

292     # Aviso se for formato "PLOT ON"
293     if (not looks_like_csv(line)) and ("F1:" in line and
294         "F2:" in line) and (not warned_plot_format):
295         print("[AVISO] Saída esta no formato do Serial
296             Plotter (PLOT ON). Envie 'PLOT OFF' para gerar
297             CSV.")
298         warned_plot_format = True
299
300     # CSV do firmware
301     if looks_like_csv(line):
302         if logging_on and current_file:
303             if line.startswith("t,"):
304                 # Cabeçalho: troca o delimitador
305                 header = line if args.csv_delim == "," else
306                     line.replace(",", args.csv_delim)
307                 current_file.write(header + "\n")
308             else:
309                 vals = parse_csv_line(line)
310                 if vals:
311                     tsec, f1, f2, f3, f4, d, lsum = vals
312                     out_line = format_csv_row(
313                         tsec, f1, f2, f3, f4, d, lsum,
314                         args.csv_delim, args.dec_sep,
315                         args.t_prec, args.val_prec
316                     )
317                     try:
318                         current_file.write(out_line + "\n")
319                         if time.time() % 1.0 < 0.02:
320                             current_file.flush()
321                     except Exception as e:
322                         print(f"[ERRO] Falha ao escrever:
323                             {e}")
324
325     # plot: so quando habilitado
326     if plotting_enabled:
327         vals = parse_csv_line(line)
328         if vals:
329             tsec, f1, f2, f3, f4, d, lsum = vals
330             vals_dict = {"F1": f1, "F2": f2, "F3": f3,
331                 "F4": f4, "D": d, "L": lsum}
332             still_open = update_plot(plot, tsec,
333                 vals_dict, args.plot_refresh)
334             if not still_open:
335                 plot = None
336                 plotting_enabled = False
337             print("[INFO] Janela de grafico
338                 fechada; seguindo sem plot.")

```

```
330
331     # comandos digitados (interativo)
332     if interactive:
333         try:
334             cmd = cmd_q.get_nowait()
335         except queue.Empty:
336             cmd = None
337         if cmd:
338             low = cmd.lower()
339             if low in ("exit", "quit"):
340                 raise KeyboardInterrupt
341             if low.startswith(".silent "):
342                 val = low.split(None, 1)[1].strip()
343                 if val in ("on", "1", "true"):
344                     args.silent = True; print("[LOCAL]
345                                     silent=ON"); continue
346                 if val in ("off", "0", "false"):
347                     args.silent = False; print("[LOCAL]
348                                     silent=OFF"); continue
349                 print("[LOCAL] use: .silent on|off"); continue
350             if low == ".help":
351                 print("[LOCAL] .silent on|off | quit/exit");
352                 continue
353
354     # STREAM ON/OFF -> abre/fecha grafico
355     if cmd.strip().upper() == "STREAM ON":
356         open_plot_if_needed()
357     elif cmd.strip().upper() == "STREAM OFF":
358         close_plot_if_open()
359
360     send_cmd(ser, cmd)
361     if not args.silent: print(f"[TX] {cmd}")
362
363 except KeyboardInterrupt:
364     print("\n[INFO] Interrompido pelo usuario.")
365     try:
366         send_cmd(ser, "PCLOG OFF")
367         send_cmd(ser, "STREAM OFF")
368     except Exception:
369         pass
370 finally:
371     if ser and ser.is_open:
372         try: ser.close()
373         except: pass
374     if current_file:
375         try:
376             current_file.flush()
```

```
374         current_file.close()
375     except:
376         pass
377     if plt is not None:
378         try: plt.close("all")
379         except Exception:
380             pass
381     print("[INFO] Conexao encerrada.")
382
383 if __name__ == "__main__":
384     main()
```