Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Graduação em Engenharia Mecânica

Análise Numérica e Experimental da Aerodinâmica de uma Motocicleta de Competição em Escala Reduzida Utilizando OpenFOAM e um Túnel de Vento

NATHAN PEREIRA FREDERICO

João Pessoa - PB
2025

NATHAN PEREIRA FREDERICO

Análise Numérica e Experimental da Aerodinâmica de uma Motocicleta de Competição em Escala Reduzida Utilizando OpenFOAM e um Túnel de Vento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. PAULO H. D. SANTOS

João Pessoa - PB
2025

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F852a Frederico, Nathan Pereira.
Análise Numérica e Experimental da Aerodinâmica de uma Motocicleta de Competição em Escala Reduzida Utilizando OpenFOAM e um Túnel de Vento / Nathan Pereira Frederico. - João Pessoa, 2025.
50 f.

Orientação: Paulo Henrique Dias dos Santos.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Aerodinâmica. 2. OpenFOAM. 3. Validação Experimental. 4. Motocicleta de Competição. 5. CFD. I. Santos, Paulo Henrique Dias dos. II. Título.

UFPB/BSCT CDU 621.01 (043.2)

Elaborado por ROSANGELA GONCALVES PALMEIRA - CRB-216

NATHAN PEREIRA FREDERICO

Análise Numérica e Experimental da Aerodinâmica de uma Motocicleta de Competição em Escala Reduzida Utilizando OpenFOAM e um Túnel de Vento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. João Pessoa - PB, Setembro de 2025:

Documento assinado digitalmente
gov.br
PAULO HENRIQUE DIAS DOS SANTOS
Data: 18/09/2025 14:30:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. PAULO H. D. SANTOS
Orientador

Documento assinado digitalmente
gov.br
JACQUES CESAR DOS SANTOS
Data: 22/09/2025 11:33:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. JACQUES CESAR DOS SANTOS

Documento assinado digitalmente
gov.br
JEAN PIERRE VERONESE
Data: 22/09/2025 21:39:20-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. JEAN PIERRE VERONESE
Examinador

João Pessoa - PB
2025

Agradecimentos

Gostaria de agradecer, primeiramente, a **Deus**, por ter estado sempre comigo, dando-me forças nos momentos mais solitários e desafiadores desta jornada.

Agradeço também à minha mãe, **Carina**, e ao meu pai, **Celso**, que fizeram o impossível para que eu pudesse chegar até aqui. Aos meus familiares, que mesmo à distância, sempre me transmitiram apoio e incentivo ao longo do caminho.

Aos meus colegas de curso — José Igor, Mohamad, Caio Ernesto, Eraldo, Júlio, Anna Beatriz, Guilherme, Mylenna e Geovani — que tiveram participação direta na minha formação e que certamente levarei como amizades para toda a vida.

Ao meu orientador, professor Paulo junto ao LINS UFPB (*Lab of Integrate Numerical Simulation*), que me ensinou a enxergar a Engenharia Mecânica sob uma nova perspectiva, ampliando minha visão sobre o vasto mundo da ciência, além de todo o apoio e dedicação para que eu alcançasse uma evolução que jamais imaginaria ter.

Ao professor Pierre, pela oportunidade de iniciar no mundo acadêmico e por todo o apoio e disponibilidade em ajudar.

E, por fim, a todos que, de alguma forma, mesmo que não presentes em todos os momentos, em especial a minha grande amiga Camila Montenegro, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional.

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise numérica e experimental da aerodinâmica de um protótipo de motocicleta de competição reduzido em escala. A abordagem numérica foi realizada com o uso do *software* de código aberto OpenFOAM, com a aplicação do modelo de turbulência SST k–ω. Em paralelo, foi construído e instrumentado um túnel de vento de baixo custo para validação experimental, composto por uma seção de testes em acrílico, um soprador de 1800 W operando em sucção e um sistema de aquisição baseado em Arduino Uno com célula de carga e módulo HX711 para medição direta da força de arrasto. Foi realizado um estudo de independência de malha, no qual três níveis de refino foram comparados a partir do coeficiente de arrasto aerodinâmico (C_D), do número de elementos e do tempo computacional. Os resultados numéricos para o coeficiente de arrasto $C_D = 0{,}59169$ e a força de arrasto $F_D = 2{,}04$ gf foram comparados com os dados experimentais $C_D = 0{,}62014$ e a força de arrasto $F_D = 2{,}14 \pm 0{,}20$ gf, apresentando uma diferença de 4,67% para a força de arrasto e 4,59% para o coeficiente de arrasto. Essa concordância valida a metodologia numérica adotada e a viabilidade do aparato experimental de baixo custo. O trabalho demonstra que a combinação de simulação computacional e validação experimental acessível é uma ferramenta poderosa e replicável para o desenvolvimento aerodinâmico em ambientes acadêmicos e para equipes de competição com recursos limitados, como as da *MotoStudent*.

Palavras-chave: Aerodinâmica. OpenFOAM. Validação Experimental. Motocicleta de Competição. CFD.

Abstract

This work presents a numerical and experimental analysis of the aerodynamics of a scaled-down competition motorcycle prototype. The numerical investigation was conducted using the open-source software OpenFOAM with the SST k–ω turbulence model. In parallel, a low-cost wind tunnel was designed and instrumented for experimental validation, featuring an acrylic test section, a 1800 W suction blower, and a data acquisition system based on an Arduino Uno with a load cell and HX711 module for direct drag force measurement. A mesh independence study was carried out, comparing three refinement levels based on the aerodynamic drag coefficient (C_D) number of elements, and computational time. The numerical results for the drag coefficient $C_D = 0.59169$ and drag force $F_D = 2.04$ gf were compared with experimental data $C_D = 0.62014$ and $F_D = 2.14 \pm 0.20$ gf, showing differences of 4.67% for the drag force and 4.59% for the drag coefficient. This close agreement validates the adopted numerical methodology and demonstrates the feasibility of the low-cost experimental apparatus. The study confirms that the combination of computational simulation and accessible experimental validation is a powerful and replicable tool for aerodynamic development in academic environments and for competition teams with limited resources, such as those in MotoStudent.

Keywords: Aerodynamics. OpenFOAM. Experimental Validation. Racing Motorcycle. CFD.

Lista de tabelas

Tabela 1 – Dimensões da motocicleta reduzida em escala - 1/15 24
Tabela 2 – Dimensões do domínio computacional 25
Tabela 3 – Parâmetros das malhas produzidas 35
Tabela 4 – Resultados do estudo de malha 35
Tabela 5 – Resultados experimentais da força de arrasto 41
Tabela 6 – Comparação entre simulação e experimento para a força de arrasto . . 41
Tabela 7 – Comparação entre simulação e experimento para o coeficiente de arrasto 42

Lista de ilustrações

Figura 1 – Modelo de motocicleta utilizado 12
Figura 2 – Projeto da seção de testes túnel de vento experimental 13
Figura 3 – Linhas de corrente em um veículo 21
Figura 4 – Malha gerada para o domínio 25
Figura 5 – Medição da velocidade do escoamento 27
Figura 6 – Componentes da seção de entrada do ar do túnel de vento 29
Figura 7 – Dimensionamento recomendado para seção de testes 30
Figura 8 – Seção de testes, bocal divergente e acoplamento para o soprador 31
Figura 9 – Soprador utilizado no túnel experimental 32
Figura 10 – Sistema de aquisição montado 33
Figura 11 – Esquema elétrico do sistema de aquisição 34
Figura 12 – Gráfico C_D vs Número de iterações 36
Figura 13 – Seção da malha gerada no OpenFOAM 36
Figura 14 – Distribuição de y^+ na superfície da motocicleta 37
Figura 15 – Histórico de convergência da malha de referência 38
Figura 16 – Protótipo confeccionado por impressão 3D 39
Figura 17 – Acoplamento do protótipo na célula de carga 39
Figura 18 – Realização da aquisição de dados experimental 40
Figura 19 – Comparação entre a força de arrasto numérica e experimental 42
Figura 20 – Comparação entre a força de arrasto numérica e experimental 43

Sumário

1 INTRODUÇÃO 11

2 OBJETIVO 14
2.1 Objetivo Geral 14
2.2 Objetivo Específico 14

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 15
3.1 Análise do Escoamento: Número de Reynolds 15
3.2 Formulação Matemática do Escoamento 15
3.2.1 Equação da Conservação da Massa 15
3.2.2 Equação da Quantidade de Movimento 16
3.2.3 Modelo de Turbulência SST k–ω 16
3.3 Funções de Parede e Parâmetro y^+ 17
3.3.1 Modelagem da Camada Limite 18
3.4 Discretização Numérica: Método dos Volumes Finitos 18
3.5 Fundamentos de Aerodinâmica 19
3.5.1 Força e Coeficiente de Arrasto 19
3.5.2 Força e Coeficiente de Sustentação 20
3.5.3 Linhas de Corrente 20
3.5.4 Simulação Computacional Aplicada ao Estudo Aerodinâmico de Motocicletas 21

4 METODOLOGIA 24
4.1 Geometria 24
4.2 Malha Computacional 24
4.2.1 Estudo de Malha 26
4.3 Condições de Contorno 26
4.4 Resolução 28
4.5 Confecção do Túnel Experimental 28
4.5.1 Sistema de Aquisição de Dados 32

5 RESULTADOS 35
5.1 Estudo de Malha 35
5.2 Medições Experimentais 38
5.2.1 Confecção do Protótipo 38
5.2.2 Aquisição de Dados 39

6 CONCLUSÃO 44
6.1 Melhorias Futuras 44

REFERÊNCIAS 46

APÊNDICE A – CÓDIGO COMPLETO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO 48

1 Introdução

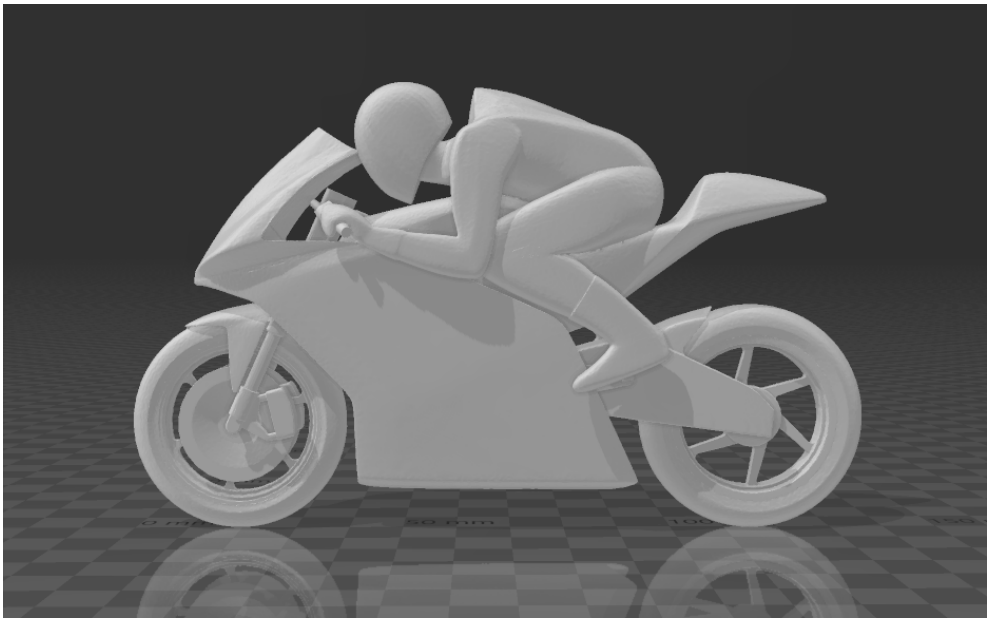
A aerodinâmica de motocicletas de competição tem papel fundamental no desempenho dinâmico em pistas, influenciando diretamente a estabilidade, o consumo energético e o tempo de volta. Dada a geometria aberta e assimétrica da moto-piloto, o escoamento ao redor desses veículos é extremamente complexo, com fortes zonas de recirculação e separação de camada limite em múltiplas regiões da geometria.

A eficiência aerodinâmica é ser fundamental para definir o desempenho do protótipo, consequentemente a sua colocação. Segundo Katz (2006) alguns dos principais objetivos aerodinâmicos dos veículos de corrida é diminuir o arrasto e otimizar a sustentação gerando aderência dos pneus com o solo. Com isso, a aplicação da simulação CFD vem se tornando uma ótima ferramenta em aplicações automotivas, permitindo a visualização e análise do fluxo do ar sobre as superfícies complexas do veículo e também calculando os coeficientes aerodinâmicos necessários, como afirmado por Anderson (1995) e essa ferramenta também possibilita a otimização de design em estágios iniciais de projetos aerodinâmicos, sem necessitar de um modelo físico, segundo Versteeg e Malalasekera (2007).

Como destacado por Winski et al. (2022), a carenagem e a postura do piloto são elementos decisivos na geração de arrasto e sustentação, o que exige uma análise detalhada do campo de velocidades e pressões ao redor da motocicleta. Complementarmente, Angeletti et al. (2018) reforçam que o uso de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) tem permitido avanços significativos na compreensão e otimização dessas geometrias, mesmo em fases iniciais de projeto.

Neste trabalho, foi utilizada a plataforma OpenFOAM para realizar simulações numéricas da aerodinâmica de uma motocicleta de competição em escala reduzida. Técnicas avançadas de geração de malha foram aplicadas com sucesso, permitindo uma boa resolução das zonas de interesse do escoamento. Apesar de não ter sido possível validar a geometria real da motocicleta, foi possível simular uma geometria padrão representativa, a qual foi também testada experimentalmente em túnel de vento. A figura 1 demonstra a geometria padrão a ser estudada:

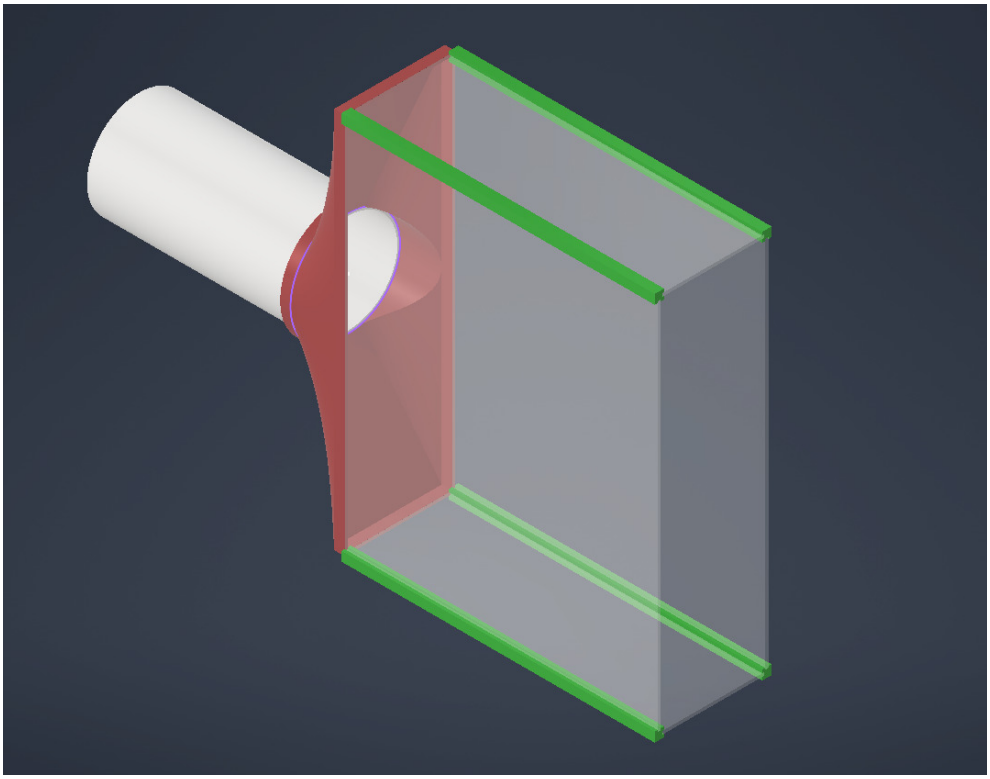
Figura 1 – Modelo de motocicleta utilizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a validação experimental, foi construída uma bancada com túnel de vento utilizando tubos de PVC, placas de acrílico, um bocal convergente e um difusor, com um soprador de 1.800 W operando por sucção. Uma superfície quadrada perpendicular ao escoamento foi posicionada na seção de testes, sendo instrumentada na base com uma célula de carga (extensômetro) para medir a força de arrasto e estimar o coeficiente de arrasto. Os testes foram capturados e listados para garantir reprodutibilidade e estimar a incerteza experimental por meio do desvio padrão. A figura 2 apresenta o projeto da seção de testes do túnel de vento:

Figura 2 – Projeto da seção de testes túnel de vento experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a comparação entre os dados obtidos numericamente (via OpenFOAM) e os dados experimentais, foi verificado um erro de aproximadamente 5%, o que comprova a consistência da abordagem numérica aplicada.

Além da relevância acadêmica, este trabalho possui uma forte motivação prática: desenvolver uma metodologia de validação experimental de baixo custo que possa ser reproduzida em laboratórios de graduação, tornando acessível o estudo da aerodinâmica veicular, sendo de suma importância para equipes de *MotoStudent*, na qual desenvolvem protótipos de motocicletas de competição com recursos limitados. Embora diversos estudos internacionais avancem na simulação de motocicletas em escala real, há uma lacuna de estudos voltados à redução de escala e construção de túneis de vento simplificados, especialmente em contextos educacionais. Assim, este trabalho diferencia-se por unir modelagem numérica detalhada a uma bancada experimental de baixo custo, servindo como ferramenta didática e de pesquisa aplicada.

2 Objetivo

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como **objetivo geral** aplicar a simulação numérica em CFD, utilizando o OpenFOAM como ferramenta principal, com validação experimental em um túnel de vento, para investigar e validar a força e o coeficiente de arrasto de uma geometria padrão representativa de motocicleta reduzida em escala.

2.2 Objetivo Específico

Como **objetivos específicos**, busca-se:

- Realizar a simulação numérica de uma geometria padrão no OpenFOAM utilizando o modelo de turbulência SST k–ω ;
- Construir uma bancada experimental simplificada para medir a força de arrasto;
- Comparar quantitativamente os resultados numéricos com os experimentais, analisando incertezas;
- Realizar um estudo de independência de malha;
- Estabelecer uma metodologia replicável de baixo custo para análises aerodinâmicas em ambientes acadêmicos.

3 Revisão Bibliográfica

Para um estudo aerodinâmico de um protótipo de uma moto de competição, bem como um projeto de túnel de vento experimental, vale embasar alguns conceitos de mecânica dos fluidos, simulação computacional e aerodinâmica veícular.

3.1 Análise do Escoamento: Número de Reynolds

O número de Reynolds (Re) é um número adimensional utilizado na mecânica dos fluidos para caracterizar o regime de escoamento de um fluido, seja em tubos, sobre superfícies ou em canais abertos. Ele é definido como a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas atuando em um fluido, sendo dado por:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \tag{3.1}$$

onde:

- ρ: densidade do fluido [kg/m^3];
- v: velocidade do escoamento [m/s];
- L: Comprimento característico [m];
- μ: viscosidade dinâmica do fluido [Pa.s];

3.2 Formulação Matemática do Escoamento

A análise do escoamento turbulento ao redor de uma motocicleta em ambiente externo é baseada nas equações de Navier-Stokes, formuladas aqui segundo a abordagem das Médias de Reynolds (RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes). Essa abordagem, amplamente adotada em aplicações industriais, permite o fechamento do sistema de equações pela introdução de modelos de turbulência que representam os efeitos dos flutuações turbulentas de forma média Wilcox (2006).

3.2.1 Equação da Conservação da Massa

A equação da conservação da massa, na forma conservativa e para escoamento incompressível, é expressa por:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{3.2}$$

onde $\vec{u}$ é o vetor velocidade média. Essa equação garante que a massa seja conservada dentro de qualquer volume de controle, não havendo fontes ou sumidouros de massa.

3.2.2 Equação da Quantidade de Movimento

As equações da quantidade de movimento em três dimensões (x, y, z), com inclusão da gravidade somente na direção vertical (y), são escritas como:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_{eff}\nabla\vec{u}) + \rho\vec{g} \tag{3.3}$$

onde:

- ρ: densidade do fluido [kg/m^3];
- $\vec{u}$: vetor velocidade média de Reynolds [m/s];
- p: pressão média [Pa];
- $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$: viscosidade efetiva (laminar + turbulenta);
- $\vec{g} = (0, -g, 0)$: vetor da gravidade.

A viscosidade turbulenta μ_t é obtida a partir de modelos de turbulência, sendo neste trabalho utilizado o modelo SST k–ω.

3.2.3 Modelo de Turbulência SST k–ω

O modelo de turbulência Shear Stress Transport (k–ω SST), proposto por Wilcox (2006), combina o modelo k–ω próximo à parede com o modelo k–ϵ nas regiões afastadas da parede. Com isso, a escolha justifica-se pela maior capacidade do modelo em capturar zonas de separação do escoamento, comuns em motocicletas de competição.

A combinação é feita por uma função de mistura F_1, que ativa ou desativa a influência de cada modelo conforme a posição no domínio.

Equações de transporte:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k\vec{u}) = P_k - \beta^*\rho k\omega + \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k\mu_t)\nabla k] \tag{3.4}$$

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\omega\vec{u}) = \alpha\frac{\omega}{k}P_k - \beta\rho\omega^2 + \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega\mu_t)\nabla\omega] + 2(1 - F_1)\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\nabla k \cdot \nabla\omega \tag{3.5}$$

onde:

- k: energia cinética turbulenta por unidade de massa (m^2/s^2);
- ω: taxa de dissipação específica (1/s);
- P_k: termo de produção de energia cinética turbulenta;
- μ_t: viscosidade turbulenta ($Pa \cdot s$);
- σ_k, σ_ω: constantes de difusão para k e ω, respectivamente;
- β, β^*: constantes de dissipação específicas do modelo;
- α: constante de produção da equação de ω;
- F_1: função de mistura que ativa ou desativa os modelos k-ϵ ou k-ω conforme a posição no domínio;
- $\sigma_{\omega 2}$: constante associada ao termo de mistura cruzada $\nabla k \cdot \nabla \omega$;

3.3 Funções de Parede e Parâmetro y^+

A modelagem próxima à parede utiliza funções de parede com base no parâmetro adimensional y^+, definido por:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\mu} \tag{3.6}$$

onde:

- u_τ: velocidade de fricção;
- y: distância até o centro da primeira célula da malha;

Segundo Foundation (2023), para que o modelo SST k–ω opere com máxima acurácia, recomenda-se que o valor de y^+ na primeira célula adjacente à parede seja inferior a 1 para modelos de baixo número de Reynolds, pois é resolvido toda a subcamada viscosa.

Em simulações com geometria complexa e número de Reynolds moderado, modelar adequadamente a camada limite é crucial. Embora o uso de camadas prismáticas seja desejável para resolver essa região com precisão, sua implementação em geometrias complexas nem sempre é viável.

Para alguns casos, pode-se recorrer ao uso de funções de parede (*wall functions*), que permitem modelar o comportamento da camada limite sem resolver diretamente a subcamada viscosa, desde que o valor adimensional y^+ esteja na faixa recomendada (tipicamente entre 30 e 300) poupando tempo e custo computacional - Foundation (2023)

3.3.1 Modelagem da Camada Limite

Para a correta modelagem das regiões próximas à parede, é de suma importância compreender o comportamento do escoamento nessa zona. Dentro da camada limite, o escoamento é subdividido em três regiões distintas, conforme descrito por SimScale (2024):

- **Subcamada viscosa ($y^+ < 5$)**: Região dominada pelos efeitos viscosos, onde as tensões turbulentas são desprezíveis. O escoamento segue a lei linear de velocidades:

$$u^+ = y^+ \tag{3.7}$$

  onde:

  - u^+: velocidade adimensionalizada pela velocidade de fricção;

- **Camada tampão ($5 < y^+ < 30$)**: Zona de transição entre as regiões dominadas pela viscosidade e pela turbulência. Nesta região, as tensões viscosas e turbulentas possuem magnitudes semelhantes, o que torna a modelagem mais complexa e menos definida.

- **Camada logarítmica ($y^+ > 30$)**: Predomínio dos efeitos turbulentos. O perfil de velocidades é descrito pela lei logarítmica de parede:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(y^+) + B \tag{3.8}$$

  onde:

  - κ: constante de von Kármán;
  - B: constante empírica;

  com $\kappa = 0,41$ e $B = 5,2$.

3.4 Discretização Numérica: Método dos Volumes Finitos

A discretização das equações diferenciais foi feita pelo método dos volumes finitos (FVM), que consiste na integração das equações governantes sobre um volume de controle arbitrário. A equação geral para uma variável escalar ϕ pode ser escrita como:

$$\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_S \rho\phi\vec{u} \cdot \vec{n} dS = \int_S \Gamma \nabla\phi \cdot \vec{n} dS + \int_V S_\phi dV \tag{3.9}$$

onde:

- Γ: coeficiente difusivo (viscosidade, condutividade etc.);

- S_ϕ: termo fonte volumétrico;
- S: superfície do volume de controle.

Detalhes da Discretização

- **Termo transiente:** discretizado pelo esquema implícito de primeira ordem Backward Euler.
- **Termo convectivo:** discretizado com esquema upwind de primeira ordem para garantir estabilidade numérica, como afirma Versteeg e Malalasekera (2007).
- **Termo difusivo:** discretizado com esquema central (CDS), proporcionando segunda ordem de precisão espacial.
- **Forças de corpo:** a gravidade foi considerada apenas na equação de momento na direção y.
- **Acoplamento pressão-velocidade:** utilizado o método SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) conforme Patankar (1980).

3.5 Fundamentos de Aerodinâmica

Diversos estudos internacionais têm contribuído para o avanço da compreensão da aerodinâmica de motocicletas por meio da aplicação de simulações computacionais e validações experimentais. Para compreendê-los de forma mais clara, é de suma importância mencionar alguns conceitos aerodinâmicos.

3.5.1 Força e Coeficiente de Arrasto

A aerodinâmica é a área da física que se dedica ao estudo da dinâmica dos fluxos de fluidos, comumente o ar. Através dessa análise, é possível quantificar a resistência que um corpo oferece ao seu movimento dentro de um meio fluido, assim obtendo coeficientes importantes para projeto e melhorias de veículos, principalmente os que exigem

A resistência ao movimento do corpo no fluido é inevitável, uma vez que fluidos reais apresentam viscosidade. Essa resistência é representada pela força de arrasto ($dragforce$), que atua como uma componente horizontal, na direção oposta ao movimento do corpo. A força de arrasto é dependente da área frontal do corpo (A_f), da velocidade do fluxo, da densidade do fluido e do coeficiente de arrasto C_D, um parâmetro fundamental nos estudos aerodinâmicos. Segundo Katz (2006) força de arrasto pode ser calculada da seguinte forma:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v^2 A_f \tag{3.10}$$

onde:

- C_D: coeficiente de arrasto do corpo em estudo;
- A_f: área frontal do corpo em estudo [m^2];

3.5.2 Força e Coeficiente de Sustentação

Na mecânica dos fluidos, quando dois fluidos escoam a velocidades distintas, resulta em diferenças de pressão, gerando uma força que impulsiona o fluido da região de alta pressão para a de baixa pressão. Essa força pode se manifestar como uma componente vertical, conhecida como força de sustentação ($liftforce$) ou como uma força dirigida para baixo ($downforce$). A força de sustentação é geralmente gerada pela assimetria da geometria do corpo e pode ser calculada com base no coeficiente de sustentação (C_L), similar a força de arrasto, como mostra a equação 3.11:

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho v^2 A_f \tag{3.11}$$

3.5.3 Linhas de Corrente

Segundo NumberAnalytics (2025), as linhas de corrente (*streamlines*) desempenham um papel vital na otimização do projeto veicular, pois permitem que se observe e analise o escoamento ao redor dos automóveis. A partir da análise das *streamlines*, é possível identificar regiões de alto arrasto, otimizar a forma da geometria e melhorar o desempenho aerodinâmico geral. A figura 3 demonstra um exemplo das linhas de corrente em um veículo

Figura 3 – Linhas de corrente em um veículo

Fonte: Nobres do Grid (2015)

3.5.4 Simulação Computacional Aplicada ao Estudo Aerodinâmico de Motocicletas

Winski et al. (2022) realizaram uma investigação abrangente da aerodinâmica de uma motocicleta esportiva utilizando diferentes abordagens numéricas em CFD, incluindo o modelo (RANS – *Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e outros métodos mais avançadas de simulação de turbulência. Os autores modelaram a geometria completa da moto com piloto e realizaram simulações em domínio aberto, comparando os modelos entre si. Os resultados mostraram que os modelos híbridos capturaram melhor os efeitos da separação de escoamento, em especial na traseira da moto, com valores mais coerentes de coeficiente de arrasto. Concluiu-se que modelos RANS tradicionais são limitados para capturar corretamente zonas de recirculação complexas.

Angeletti et al. (2018) investigaram o impacto da geometria da carenagem e da postura do piloto no desempenho aerodinâmico de uma moto de competição. Utilizaram o ANSYS Fluent com malha refinada e modelo de turbulência SST k–ω, simulando diversas configurações de geometria. Os principais resultados indicaram que pequenas alterações no ângulo do para-brisa e posicionamento do piloto podem impactar significativamente o coeficiente de arrasto. Os autores concluíram que o uso de CFD é fundamental para guiar o design aerodinâmico de motos em estágios iniciais de desenvolvimento.

Fintelman et al. (2015) realizaram uma análise numérica do comportamento aerodinâmico de motocicletas sob ação de ventos laterais. Para isso, modelaram a moto com piloto utilizando OpenFOAM, aplicando os modelos RANS e DDES. Os resultados

demonstraram a sensibilidade do escoamento ao ângulo de incidência do vento, com grandes variações na força lateral e momentos de guinada. Os autores concluíram que o uso de modelos de turbulência avançados é essencial para prever corretamente os efeitos dinâmicos de estabilidade lateral.

Concli, Gobbi e Gorla (2018) conduziram um estudo específico sobre a influência das rodas em rotação na aerodinâmica de uma motocicleta. Utilizaram OpenFOAM com abordagem de malha móvel (AMI - $ArbitraryMeshInterface$) e referencial rotativo (MRF - $MultipleReferenceFrame$) para simular o movimento das rodas. Os resultados indicaram que a rotação das rodas contribui com até 8% da força de arrasto total, principalmente devido à interação do fluxo com o paralama. Concluíram que simulações com rodas fixas subestimam os efeitos reais e podem acarretar em erros elevados.

Pujol (2025) desenvolveu uma tese de mestrado focada na análise aerodinâmica de uma motocicleta de *speedway*. Utilizou o software ANSYS Fluent para simular a moto em diferentes ângulos de inclinação, representando condições reais de curva. O estudo revelou que a inclinação lateral influencia fortemente a distribuição de pressão ao redor da carenagem. A conclusão principal foi que, para competições de *speedway*, é possível otimizar o desenho da carenagem visando o equilíbrio entre arrasto e sustentação lateral.

Capuana e Peri (2022) exploraram o processo de seleção de perfis aerodinâmicos e desenho de *winglets* para gerar $downforce$ (sentido contrário a sustentação) em motocicletas de competição. O estudo utilizou modelos 2D e 3D no Ansys Fluent, com foco na região frontal e nos apêndices laterais. Os resultados mostraram que perfis assimétricos podem gerar significativa força descendente, com impactos mínimos no arrasto. Concluíram que o uso racional de *winglets* pode melhorar a aderência nas curvas sem comprometer a velocidade máxima.

González-Arcos (2020) apresentou uma análise de apêndices aerodinâmicos inspirados em motos da MotoGP, com o objetivo de compreender seus efeitos em aceleração e curvas. Utilizou simulações simplificadas no SolidWorks *Flow Simulation*, comparando diferentes configurações de asas e spoilers. Os resultados indicaram que, embora o aumento de $downforce$ contribua para maior estabilidade em curvas, o arrasto adicional pode reduzir a eficiência em retas. A principal conclusão foi que o equilíbrio entre essas forças é essencial para desempenho ideal.

Sedlak (2012) investigou, em sua dissertação, o efeito de interferências aerodinâmicas durante curvas em alta velocidade. O autor modelou a moto com apêndices aerodinâmicos e simulou cenários de curva com OpenFOAM. Descobriu que forças laterais geradas por *winglets* são relevantes para estabilidade em curvas fechadas. A conclusão foi que esses elementos, quando bem projetados, podem aumentar a segurança e o desempenho sem prejuízos significativos ao arrasto total.

Em conjunto, esses trabalhos demonstram o avanço das simulações computacionais

em ambientes cada vez mais realistas e a importância da validação experimental, além de destacar o papel crescente dos apêndices aerodinâmicos no design de motocicletas de competição.

4 Metodologia

Para a realização da simulação computacional foi seguido o fluxo metodológico clássico da dinâmica dos fluidos computacional (CFD). As etapas englobaram a confecção da geometria de estudo (motocicleta de competição reduzida em escala), geração da malha computacional com os devidos refinamentos, definição das condições de contorno e seleção do modelo de turbulência, setup do solver, resolução e, por fim, os resultados. Em paralelo, a construção do túnel de vento e aquisição dos dados para a validação experimental.

4.1 Geometria

A geometria utilizada na simulação representa uma motocicleta de competição carenada com piloto. O modelo foi obtido a partir da plataforma GrabCAD, consistindo em uma versão modificada da geometria disponível no tutorial *motorBike* do OpenFOAM.

Com o objetivo de viabilizar a simulação em um domínio computacional reduzido e compatível com as futuras validações experimentais, o modelo foi escalado em uma razão de 1:15 utilizando o *software* CAD Salomé. Nessa mesma plataforma, a geometria foi exportada no formato STL (*stereolithography*), o qual é requerido pelo utilitário *snappyHexMesh* do OpenFOAM por representar a superfície do sólido por meio de malhas.

A tabela 1 representa as dimensões da motocicleta depois da redução em escala:

Tabela 1 – Dimensões da motocicleta reduzida em escala - 1/15

Dimensão	**Valor (cm)**
Comprimento	13,6
Altura	8,3
Largura	4,0

4.2 Malha Computacional

Com a geometria já presente no diretório adequado do OpenFOAM, primeiramente, a malha do domínio computacional foi gerada a partir da ferramenta *blockMesh*.

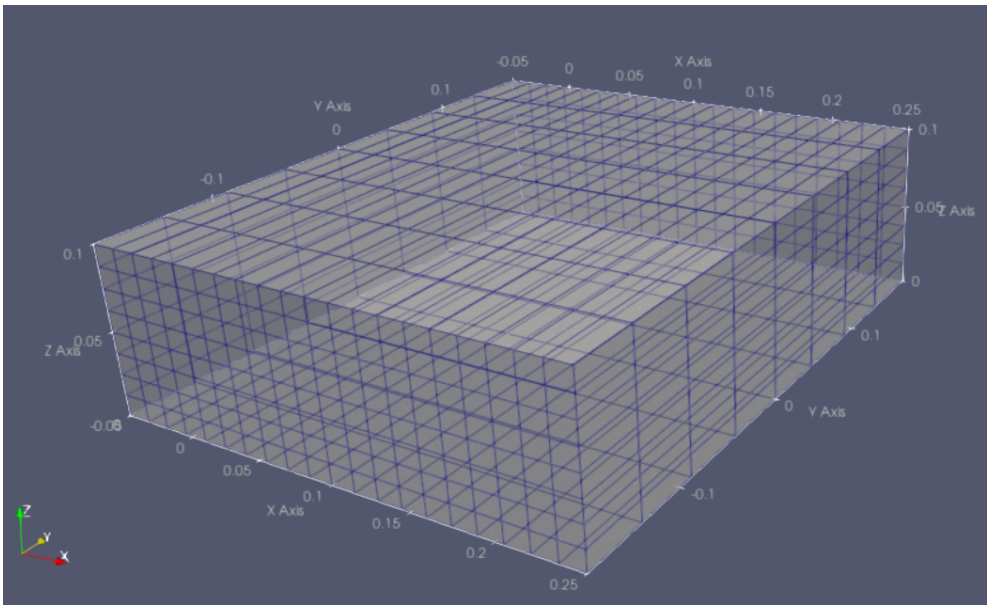
Para definição do domínio, considerou-se apenas a seção de testes do túnel de vento experimental, com o objetivo de reduzir a complexidade geométrica e computacional da simulação. O arquivo de configuração do *blockMeshDict* foi ajustado para criar um domínio retangular com as dimensões referentes ao projeto do túnel experimental, como demonstra a tabela 2:

Tabela 2 – Dimensões do domínio computacional

Eixo	**Sentido Negativo (cm)**	**Sentido Positivo (cm)**	**Total (cm)**
X (Comprimento)	5,0	25,0	30,0
Y (Largura)	17,9	17,9	35,8
Z (Altura)	0,0	10,0	10,0

Além da definição das dimensões do domínio computacional, a malha foi discretizada uniformemente por meio do parâmetro *blocks* no arquivo $blockMeshDict$, onde o domínio foi dividido em (20 8 8) células, correspondendo a 20 divisões no eixo X, 8 divisões no eixo Y e 8 divisões no eixo Z, como ilustra a figura 4:

Figura 4 – Malha gerada para o domínio



Fonte: Elaborado pelo autor.

A extração da geometria da motocicleta foi realizada por meio do utilitário $surfaceFeatures$, que identifica características da superfície a serem consideradas na geração da malha.

Na sequência, foi utilizado o comando $decomposePar$, com o objetivo de permitir a execução paralela da malha, aproveitando todos os núcleos do processador da máquina utilizada (Ryzen 5 5500U, com 6 threads). Em seguida, o comando $mpirun\ -np\ 6\ snappyHexMesh\ -overwrite\ -parallel$ é executado, realizando a geração da malha final de forma paralela. Esse processo utiliza como base a malha inicial do domínio criada pelo $blockMesh$, incorporando os refinamentos e ajustes definidos.

Os ajustes da malha são realizados no diretório $snappyHexMeshDict$, onde é possível ajustar diversos parâmetros, como o nível de refinamento próximo à geometria,

número de iterações e a geração de camadas prismáticas, aspectos fundamentais para futuros estudos de malha e cálculo de parâmetros como o número adimensional y^+.

No diretório, foi configurado para este estudo um nível 4 de refinamento em $features$, um nível (4 5) de refinamento da topografia em $refinementSurfaces$ com um ângulo $resolveFeatureAngle$ de 30°e um $refinamentBox$ nível 4. Vale ressaltar que não foi utilizada camadas prismáticas na confecção da malha, por conta da alta complexidade da geometria de estudo, porém o parâmetro y^+ foi controlado para valores próximo de 1 para que fosse possível resolver a subcamada viscosa.

Por fim, a qualidade da malha foi avaliada por meio do comando $checkMesh$. Nessa etapa, diversos parâmetros são verificados, com destaque para o critério de $Max\ skewness$, que, segundo Marques (2019), está relacionado ao controle de células de malha deformadas. Para a malha de referência utilizada, foi emitido um alerta nesse critério. Entretanto, devido à presença de múltiplas regiões curvas na geometria em estudo, é esperado que algumas células apresentem deformações. Esse aspecto pode impactar a convergência da simulação e, de certa forma, influenciar os resultados obtidos.

4.2.1 Estudo de Malha

Com o objetivo de assegurar a confiabilidade dos resultados numéricos, bem como otimizar o custo computacional, é realizado um estudo de independência de malha. Esse estudo consiste em avaliar a sensibilidade das variáveis de interesse em relação ao refinamento da malha, verificando se alterações na malha influenciam significativamente os resultados obtidos.

O estudo terá como base as configurações estabelecidas na seção anterior, com o objetivo de investigar se um refinamento adicional da malha, ou até mesmo um menor refino para diminuir custo computacional, exercerá influência significativa sobre os resultados obtidos.

A seguir, os resultados obtidos com cada configuração de malha são comparados com o objetivo de avaliar a independência de malha. Os resultados do estudo serão demonstrados na seção de resultados.

4.3 Condições de Contorno

Com a malha finalizada, é realizada à definição das condições de contorno. Para isso, utilizou-se como referência o tutorial $motorBike$ fornecido pelo próprio OpenFOAM, que apresenta uma configuração adequada para simulações aerodinâmicas.

A condição de entrada de ar no domínio, denominada $inlet$, foi definida com uma velocidade uniforme constante, representando o escoamento baseado na medição do túnel

experimental. Para a definição da velocidade do escoamento, foi utilizado um anemômetro digital posicionado no centro da seção de testes, conforme a figura 5.

Figura 5 – Medição da velocidade do escoamento

Fonte: Elaborado pelo autor.

As velocidades na seção de testes variaram entre 4,6 m/s e 5,8 m/s. Foi escolhido o valor de 5 m/s por ser um valor médio e constituir um valor de referência arredondado, podendo simplificar cálculos mantendo a representatividade dos resultados.

A partir da velocidade medida no túnel de vento experimental e utilizando a equação 3.1, obteve-se um número de Reynolds aproximado de 46000. Esse valor caracteriza um regime de escoamento em transição para a turbulência. No entanto, devido à elevada complexidade geométrica do modelo em estudo, que intensifica as perturbações no escoamento, optou-se por considerar o escoamento como turbulento.

Na região de saída *outlet*, foi imposta uma condição de pressão de referência, correspondente à pressão atmosférica, permitindo o escoamento livre do fluido.

Nas paredes laterais e superior do domínio computacional, foi aplicada a condição de escorregamento (*slipwall*), que desconsidera os efeitos viscosos e reduz o custo computacional. Para o piso do túnel, utilizou-se a condição de valor fixo de velocidade ($fixedValue$), representando um solo móvel, a fim de eliminar a formação da camada limite junto à superfície inferior do domínio, condição comum em ensaios aerodinâmicos de veículos. Já nas superfícies da motocicleta, foi adotada a condição de não escorregamento ($no - slipwall$), essencial para a correta simulação da camada limite e dos efeitos viscosos

nas regiões próximas à geometria.

Com o modelo de turbulência adotado sendo SST k–ω ($Shear\ Stress\ Transport$), como dito anteriormente, a simulação foi realizada sem o uso de funções de parede ($wallfunctions$) fornecidas pelo OpenFOAM, adequadas para a resolução da região próxima à parede dentro da faixa de y^+ compatível.

Foram configuradas um total de 120 iterações, com um *timestep* (passo de tempo) de 1 segundo, com um critério de convergência de 10^{-7} para a pressão e 10^{-8} para a velocidade, k e ômega, padrão do tutorial $motorBike$.

4.4 Resolução

A simulação foi conduzida em regime estacionário utilizando o *solver* $simpleFoam$, um dos *solvers* do OpenFOAM voltado para simulações incompressíveis, monofásicas e em regime permanente ($steady-state$) com escoamento turbulento.

Antes da simulação principal, foi utilizado o solver $potentialFoam$ para resolver o escoamento potencial do fluido. Esse procedimento tem como objetivo inicializar o campo de velocidades, resolvendo uma versão simplificada do problema, facilitando a convergência do solver.

Em seguida, foi utilizado o comando $mpirun\ -np\ 6\ simpleFoam\ -overwrite\ -parallel$ para executar o solver utilizando todos os núcleos do processador em paralelo (no caso, 6).

4.5 Confecção do Túnel Experimental

Com o objetivo de validar os resultados obtidos por simulação numérica, foi construído um túnel de vento em escala reduzida. A seção de testes possui geometria retangular e comporta uma superfície quadrada posicionada perpendicularmente ao escoamento. Na parte posterior dessa superfície foi instalada uma célula de carga com extensômetro, de forma a medir diretamente a força de arrasto gerada pela interação entre o ar e o corpo de prova.

O túnel de vento foi construído com placas de acrílico, manufatura aditiva e tubos PVC.

As conexões entre as placas acrílicas e os bocais foram realizadas por meio de componentes fabricados via manufatura aditiva (impressão 3D), projetados para garantir o encaixe preciso. Esses componentes foram fixados por parafusos, assegurando a vedação.

Adicionalmente, as interfaces entre os tubos de PVC e as entradas/saídas do túnel de vento também foram feitas por acoplamentos personalizados em manufatura aditiva, permitindo a integração eficiente entre os diferentes materiais.

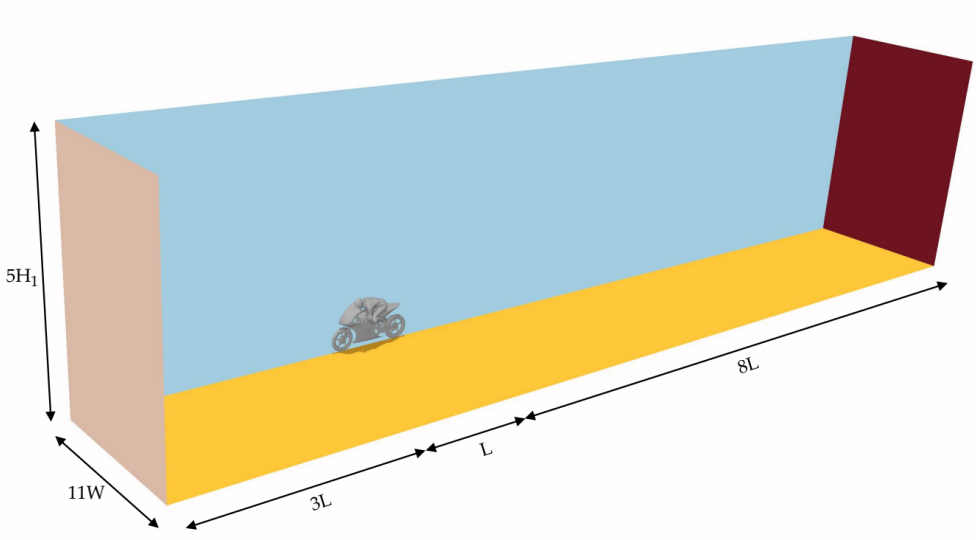
A figura 6 ilustra os componentes da seção de entrada pra seção de testes:

Figura 6 – Componentes da seção de entrada do ar do túnel de vento

Fonte: Elaborado pelo autor.

As dimensões da seção de teste foram definidas de acordo com os recursos disponíveis, buscando garantir que a interferência nos resultados fosse a mínima possível. Vale ressaltar que o dimensionamento foi uma limitação deste estudo, pois segundo Guerrero e Castilla (2020) e Heft, Indinger e Adams (2012) boas práticas de dimensionamento são ideais para evitar que interferências das fronteiras do domínio gerem instabilidades numéricas ou comprometam a precisão dos resultados. Um exemplo de dimensionamento adequado foi ilustrado por Winski et al. (2022), conforme apresentado na figura 7:

Figura 7 – Dimensionamento recomendado para seção de testes



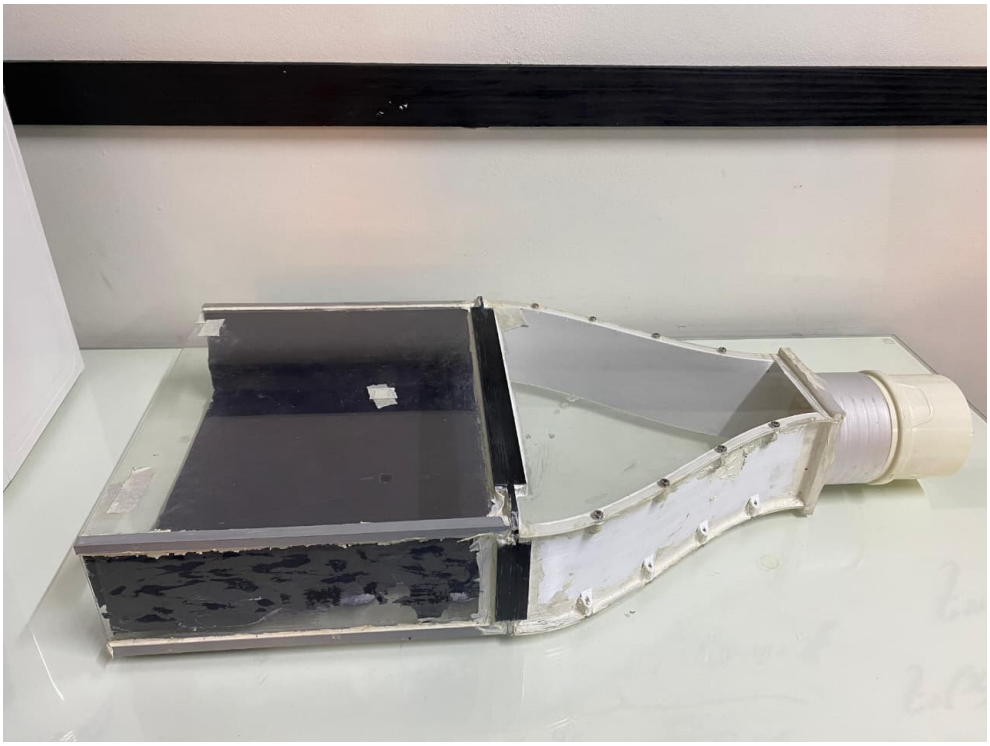
Fonte: Winski et al. (2022).

onde:

- L: comprimento da geometria em estudo;
- H_1: altura da geometria em estudo;
- W: largura da geometria em estudo;;

A figura 8 expõe o resultado da confecção da seção de testes do túnel de vento experimental, junto com o bocal divergente e o acoplamento do soprador.

Figura 8 – Seção de testes, bocal divergente e acoplamento para o soprador



Fonte: Elaborado pelo autor.

O movimento do ar foi promovido por um soprador centrífugo de potência 1800W, ilustrado na imagem 9, operando de forma invertida (modo de sucção). Essa configuração tem como vantagem a melhoria na uniformidade do perfil de velocidade dentro da seção de testes e a redução das flutuações turbulentas de entrada.

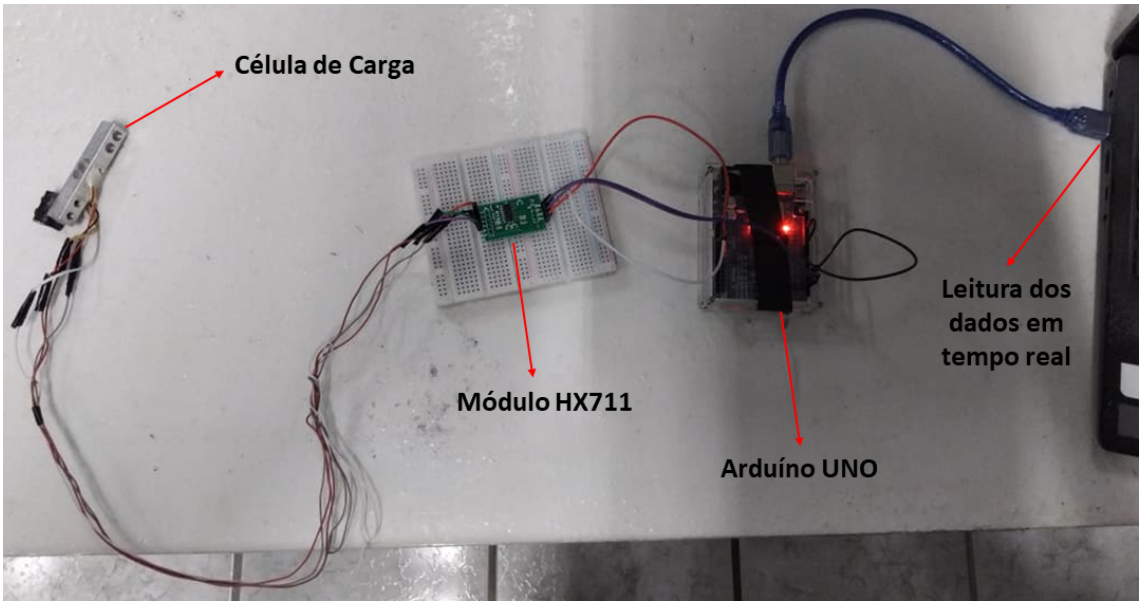
Figura 9 – Soprador utilizado no túnel experimental

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.1 Sistema de Aquisição de Dados

Para a aquisição dos dados referentes à força de arrasto no protótipo instalado na seção de testes do túnel de vento, foi implementado um sistema baseado no Arduino Uno, integrado ao módulo amplificador HX711 e a uma célula de carga.

Figura 10 – Sistema de aquisição montado



Fonte: Elaborado pelo autor.

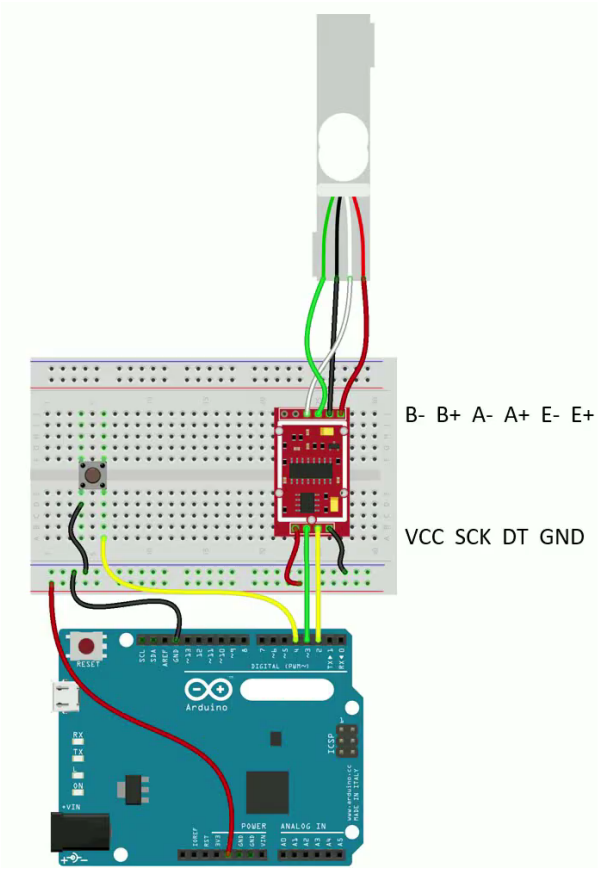
O Arduino Uno desempenha o papel de microcontrolador central, responsável por interpretar os sinais analógicos provenientes da célula de carga, que, por sua vez, são amplificados e convertidos em sinais digitais pelo módulo HX711.

A célula de carga foi fixada na sede feita na seção de testes, de forma a captar a força de arrasto gerada durante os ensaios no túnel.

O código-fonte utilizado para a aquisição dos dados foi desenvolvido em linguagem C++, utilizando a IDE do Arduino. Através da própria interface da IDE, foi possível monitorar os dados em tempo real por meio do terminal serial, o que permitiu uma análise dos valores de força captados durante os testes.

O código implementado conforme o apêndice A contempla rotinas de leitura, conversão e calibração da célula de carga, bem como a funcionalidade de zeragem por meio do botão físico no próprio arduíno. A figura 11 mostra como foi efetuado as conexões do sistema de aquisição:

Figura 11 – Esquema elétrico do sistema de aquisição



Fonte: Ideias (2019).

5 Resultados

5.1 Estudo de Malha

Como discutido anteriormente, o estudo de independência de malha é fundamental para assegurar que as variáveis de interesse não sejam significativamente influenciadas pela malha utilizada, garantindo, assim, a confiabilidade dos resultados numéricos.

Foram geradas três configurações distintas de malha: uma malha de menor resolução (mais grosseira), uma malha intermediária e uma malha de maior refinamento.

Os critérios de refinamento foram definidos no diretório $snappyHexMeshDict$, conforme detalhado na Seção 4.2.

Para a malha 1 foi configurado um nível 3 de refinamento em $features$, um nível (3 4) de refinamento da topografia em $refinementSurfaces$ com um ângulo $resolveFeatureAngle$ de 30°e um $refinamentBox$ nível 2. Já para a malha 3, foi configurado um nível 5 de refinamento em $features$, um nível (5 6) de refinamento da topografia em $refinementSurfaces$ com um ângulo $resolveFeatureAngle$ de 30°e um $refinamentBox$ nível 5.

A Tabela 3 apresenta as características principais de cada malha gerada no OpenFOAM:

Tabela 3 – Parâmetros das malhas produzidas

Parâmetro	**Malha 1**	**Malha 2**	**Malha 3**
Nº de elementos	70 664	521 298	1 867 824
y^+ médio	14,52	7,02	1,94
y^+ máximo	88,48	40,45	23,58

Calculado a área frontal do protótipo reduzido em escala através de $softwares$ CAD (A_f = 0,00221 m²), considerando a velocidade do escoamento (v = 5 m/s) medido através do anemômetro digital e os demais parâmetros utilizados como o padrão do tutorial $motorBike$, foi realizado a simulação computacional das três malhas.

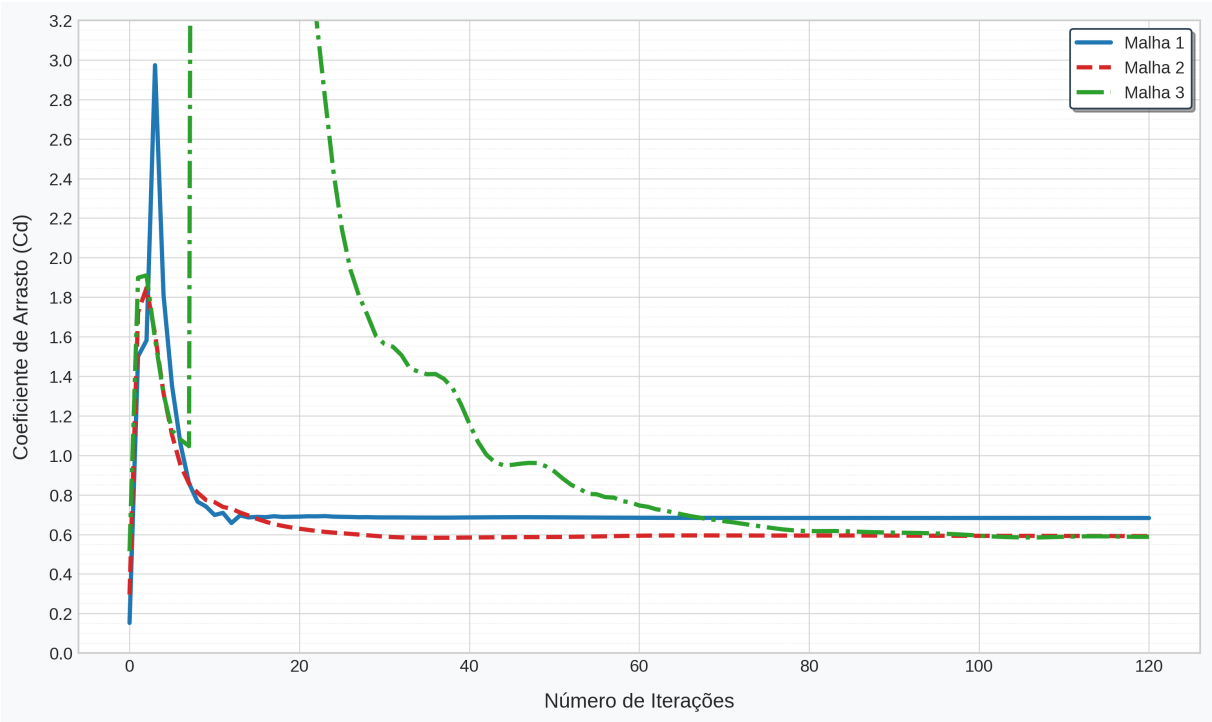
A tabela 4 demonstra os resultados obtidos do coeficiente de arrasto (C_D):

Tabela 4 – Resultados do estudo de malha

Malha	C_D	**Diferença (%)**	**Tempo Total de Simulação**
1	0,68327	-	3min 04s
2	0,59169	-13,39%	11min 34s
3	0,58809	-0,61%	37min 31s

Observa-se que todas as malhas apresentaram boa estabilização nos valores do coeficiente de arrasto, conforme ilustrado na figura 12:

Figura 12 – Gráfico C_D vs Número de iterações



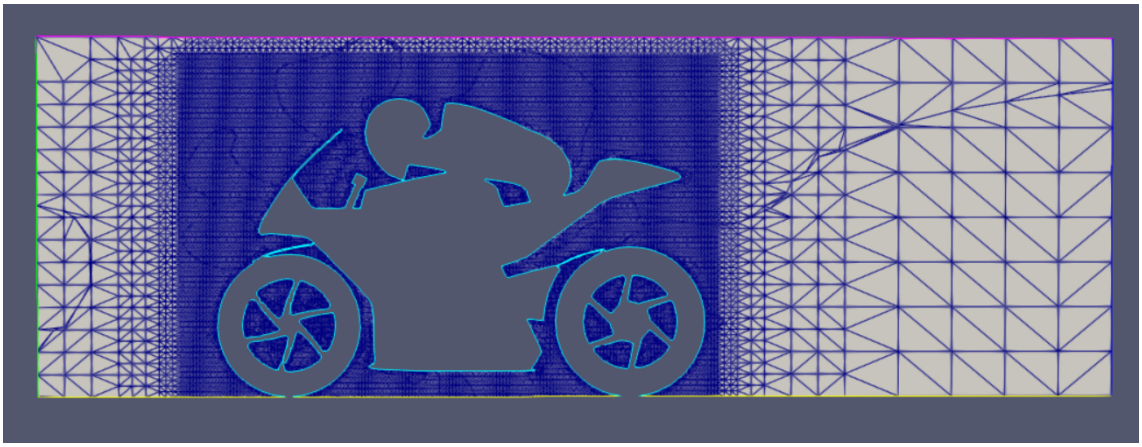
Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que a diferença entre a malha intermediária (malha 2) e a malha mais refinada (malha 3) foi de apenas 0,61%, indicando que, mesmo com um aumento no refinamento, a variação nos resultados do coeficiente de arrasto é pouco significativa.

Dessa forma, optou-se por considerar os resultados obtidos da malha intermediária, cujos parâmetros de refinamento estão detalhados na seção 4.2, garantindo confiabilidade nos valores obtidos sem um elevado custo computacional.

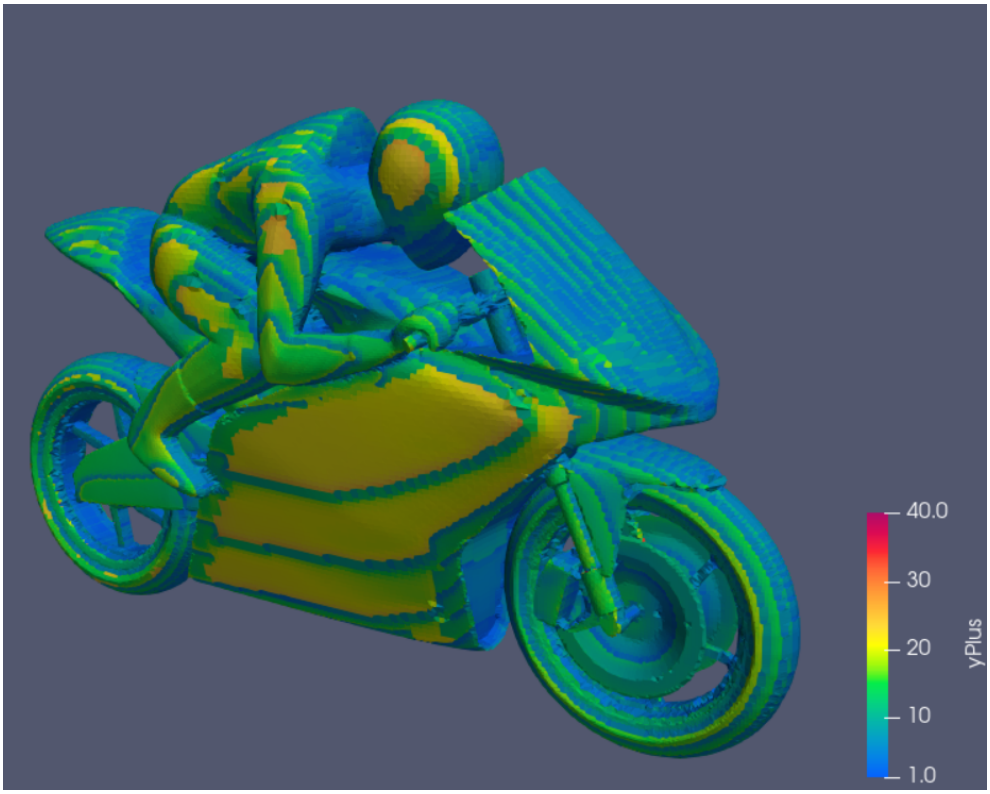
As figuras 13 e 14 mostram detalhes da malha de referência (malha intermediária).

Figura 13 – Seção da malha gerada no OpenFOAM



Fonte: Elaborado pelo autor.

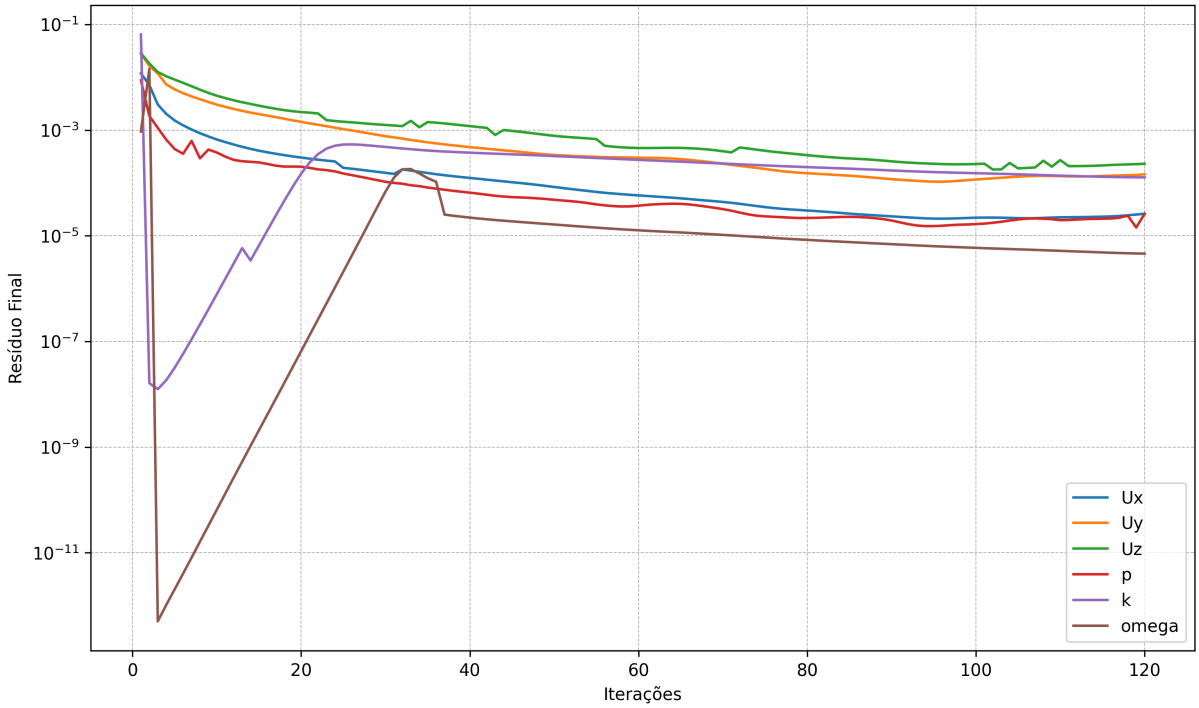
Figura 14 – Distribuição de y^+ na superfície da motocicleta



Fonte: Elaborado pelo autor.

A figura 15 exibe o histórico de convergência dos resíduos da simulação para a malha de referência (malha 2). É importante destacar que, embora o critério de convergência não tenha sido atingido, observa-se uma nítida estabilização dos resíduos a partir da iteração 40.

Figura 15 – Histórico de convergência da malha de referência



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2 Medições Experimentais

5.2.1 Confecção do Protótipo

Para coletar os dados das forças de arrasto, o protótipo em escala reduzida foi confeccionado por manufatura aditiva, utilizando-se uma impressora 3D do modelo Ender 3 V3 SE. O material selecionado para a impressão foi o ácido polilático (PLA), escolhido por suas boas propriedades mecânicas e estabilidade dimensional.

O processo de impressão do protótipo foi realizado em duas etapas, imprimindo duas metades para depois serem coladas, garantindo uma melhor qualidade de impressão. O tempo de impressão foi de 2h 44min para cada uma das metades.

Foram realizadas pequenas adaptações no protótipo para garantir uma boa estabilidade e fixação na célula de carga. A figura 16 evidencia o resultado da impressão da motocicleta em escala reduzida:

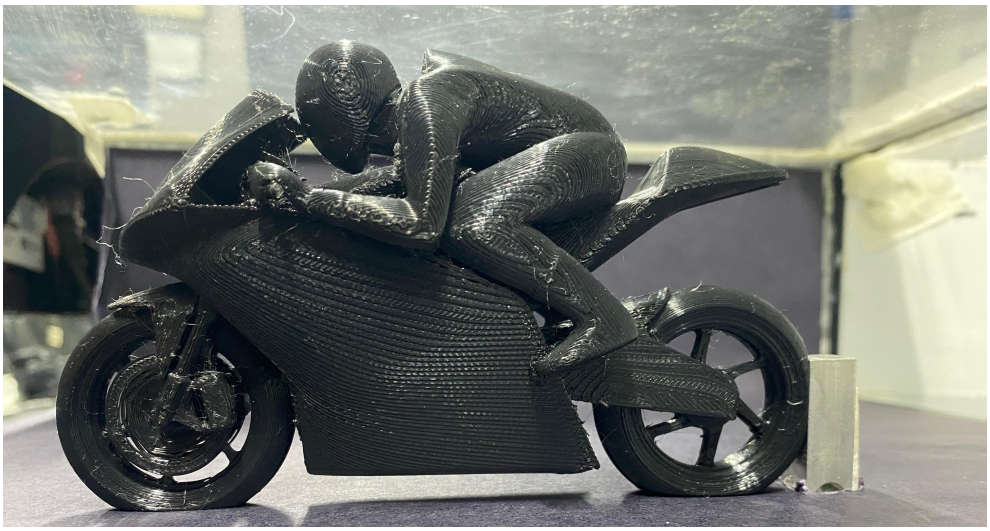
Figura 16 – Protótipo confeccionado por impressão 3D

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2 Aquisição de Dados

Para a aquisição da força de arrasto, foi realizada inicialmente a calibração da célula de carga através de pesos padrões, utilizando o código implementado. Com a célula devidamente calibrada, o protótipo foi fixado na célula de modo que não interferisse na sua área frontal, como exibe a figura 17:

Figura 17 – Acoplamento do protótipo na célula de carga

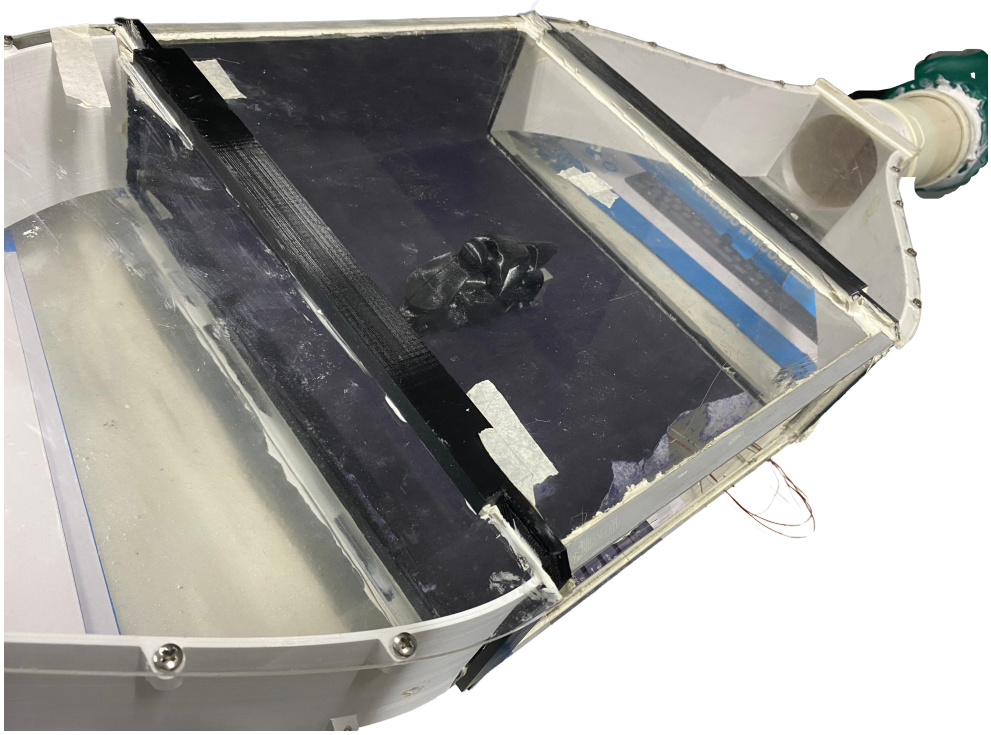


Fonte: Elaborado pelo autor.

Logo, o túnel de vento foi preparado e organizado para o início da campanha

experimental de aquisição dos dados de força de arrasto. A Figura 18 ilustra a configuração final do túnel:

Figura 18 – Realização da aquisição de dados experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

Então, aplicando-se o procedimento de tara para zerar a leitura, o soprador foi acionado em sua potência máxima, estabelecendo um escoamento de ar no interior do túnel de vento experimental.

Com isso, foram coletados cinco dados de força de arrasto, a fim de estimar a incerteza experimental associada à força medida. Vale ressaltar que, por conta do código de aquisição do arduíno, cada valor coletado corresponde a média de 5 valores coletados em tempo real, aumentando ainda mais a confiabilidade dos resultados.

Seguindo a abordagem tipo A do *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)* da Standardization (1995), a incerteza padrão associada à força de arrasto foi calculada por:

$$u(F_D) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(F_{D,i} - \bar{F}_D)^2} \tag{5.1}$$

sendo:

- $n = 5$: número de repetições;
- $F_{D,i}$: valor individual da força de arrasto;

- $\bar{F}_D$: média das medições.

A incerteza expandida U foi obtida com um fator de abrangência $k = 2$ (nível de confiança de aproximadamente 95%):

$$U = k \cdot u(F_D) \tag{5.2}$$

Com isso, a força de arrasto foi expressa com incerteza associada:

$$F_D = \bar{F}_D \pm U \tag{5.3}$$

A tabela 5 mostra os resultados experimentais coletados com suas respectivas incertezas.

Tabela 5 – Resultados experimentais da força de arrasto

Medição	**Força (gf)**
1	2,19
2	2,13
3	2,08
4	2,27
5	2,02
Média	**2,14**
Incertezas (gf)	
Incerteza padrão	±0,1
Incerteza expandida	±0,2

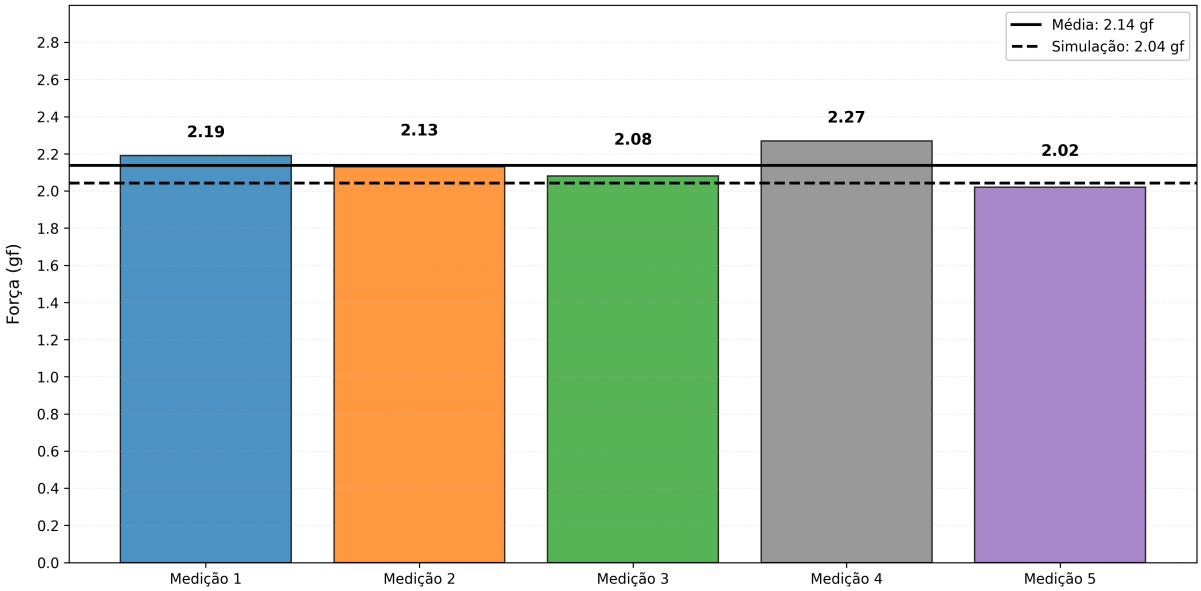
Os resultados experimentais indicaram uma força de arrasto média de 2,14 ± 0,20 gf, obtida através das cinco medições independentes. Quando comparado ao valor simulado de 2,04 g predito pela simulação computacional (obtido através da equação 3.8 considerando o coeficiente de arrasto da malha de referência), observa-se uma diferença relativa de apenas 4,67%, valor esse dentro da faixa de incerteza experimental.

Tabela 6 – Comparação entre simulação e experimento para a força de arrasto

Método	**Força (gf)**	**Diferença (gf)**	**Diferença (%)**
Simulação Computacional	2,04	+0,1	+4,67
Experimento (média)	2,14		

A figura 19 apresenta o gráfico comparativo dos resultados da simulação computacional e da validação experimental.

Figura 19 – Comparação entre a força de arrasto numérica e experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para manter a coerência dos resultados, realizou-se também uma comparação entre os coeficientes de arrasto (C_D) simulado e experimental. A partir dos valores de força de arrasto obtidos experimentalmente, calculou-se o coeficiente de arrasto experimental com auxílio da Equação 3.8. A força de arrasto foi convertida da unidade de gramas-força (gf) para Newtons (N) através do fator de conversão (1 gf = 0,00980665 N). Os resultados comparativos são apresentados na Tabela 7.

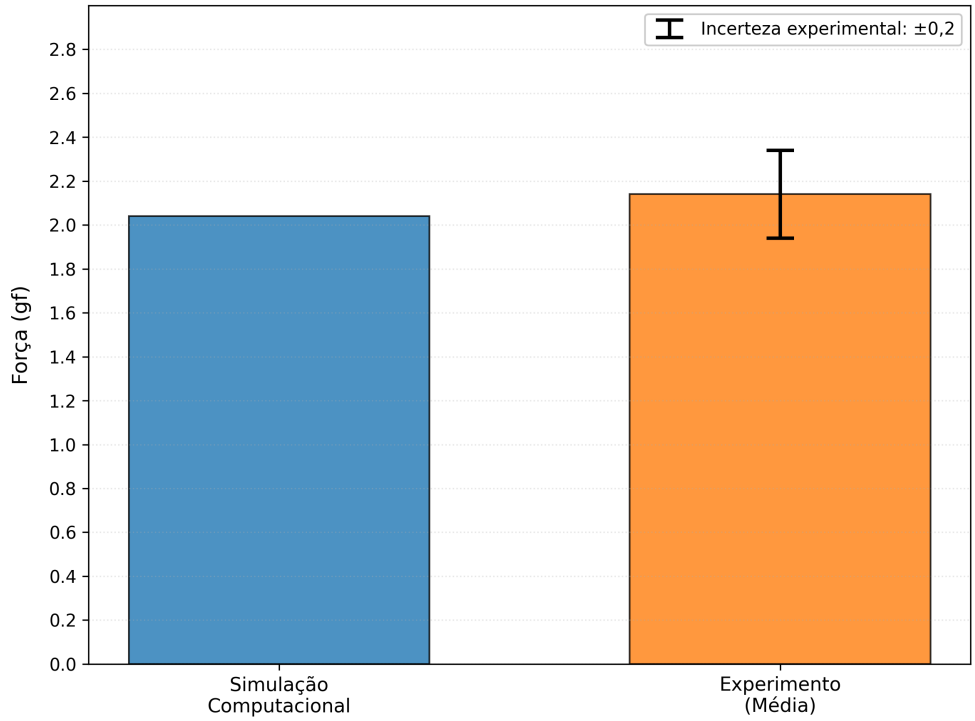
Tabela 7 – Comparação entre simulação e experimento para o coeficiente de arrasto

Método	C_D	**Diferença** (ΔC_D)	**Diferença (%)**
Simulação Computacional	0,59169	+0,02845	+4,59
Experimento (média)	0,62014		

Esses valores foram utilizados para comparação direta com os resultados numéricos da simulação CFD, permitindo avaliar a fidelidade do modelo computacional. Este arranjo experimental permitiu uma análise quantitativa eficaz da força e coeficiente de arrasto, fornecendo uma base confiável para a validação da modelagem numérica.

A Figura 20 ilustra o comparativo entre a força de arrasto obtida por simulação computacional e os valores experimentais, incluindo a respectiva barra de incerteza:

Figura 20 – Comparação entre a força de arrasto numérica e experimental



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar do condizente resultado, vale ressaltar a dificuldade de aquisição de dados experimental, devido as grandes variações dos valores produzidos pela célula de carga.

6 Conclusão

Através deste estudo, verificou-se a viabilidade da validação de protótipos de motocicletas de competição, bem como de outros veículos, por meio de simulação computacional no OpenFOAM junto a um túnel de vento, obtendo resultados satisfatórios e de grande utilidade, especialmente para equipes estilo MotoStudent, satisfazendo o objetivo geral deste estudo.

Evidenciou-se também a confiabilidade da modelagem matemática aplicada, com destaque para o bom desempenho do modelo de turbulência SST k–ω e o estudo da malha aplicada. Essa validação é particularmente relevante por ser obtida através do software open-source OpenFOAM, que elimina custos de licenciamento sem comprometer o rigor científico, demonstrando que soluções computacionais acessíveis podem produzir resultados consistentes com experimentos.

Também foi possível aprofundar o entendimento de conceitos fundamentais da aerodinâmica automotiva, como as relações entre pressão e velocidade, conceito de linhas de corrente e a determinação das forças de arrasto. Este trabalho configura-se, portanto, como um estudo inicial que pode servir de base para análises mais detalhadas utilizando a mesma abordagem.

6.1 Melhorias Futuras

Como melhorias para trabalhos futuros, sugere-se uma abordagem mais prática, com a utilização de protótipos físicos já desenvolvidos, avaliando as linhas de corrente junto com o coeficiente de sustentação (C_L), diferentes geometrias de carenagem, a inserção de elementos aerodinâmicos adicionais, como asas, bem como a análise de diferentes posicionamentos do piloto.

No que diz respeito à modelagem numérica, sugere-se melhoria da representação da camada limite por meio da inserção de camadas prismáticas utilizando o recurso $addLayers$ do $snappyHexMesh$, o que possibilitaria maior resolução dos gradientes próximos à parede e também sugere-se uma análise mais detalhada dos campos de escoamento. Além disso, a aplicação do modelo $LargeEddySimulation$ (LES), disponível no próprio OpenFOAM, permitiria capturar de forma mais realista as flutuações do escoamento, enriquecendo a qualidade dos resultados.

No âmbito experimental, recomenda-se a implementação de técnicas de visualização de linhas de corrente, bem como o desenvolvimento de um projeto mais robusto de dimensionamento do túnel de vento, de modo a minimizar os efeitos de confinamento sobre o escoamento. Um reprojeto adequado das dimensões do túnel contribuiria também para

uma melhor aquisição das forças aerodinâmicas, visto que em túneis de pequeno porte os protótipos devem ser igualmente reduzidos, resultando em forças de baixa magnitude medidas pelas células de carga, o que dificulta a estabilização e a precisão dos resultados experimentais.

Referências

ANDERSON, J. D. *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. Nova York: McGraw-Hill, 1995.

ANGELETTI, A. et al. The role of cfd on the aerodynamic development of a racing motorbike. In: *SAE Technical Paper Series*. [S.l.]: SAE International, 2018.

CAPUANA, A.; PERI, L. *A CFD study from airfoil selection to winglet design for downforce generation*. Dissertação (Mestrado) — Politecnico di Milano, 2022. PhD thesis.

CONCLI, F.; GOBBI, M.; GORLA, C. Aerodynamic study of motorcycle racing wheels using cfd simulations. *Advances in Fluid Mechanics XII*, WIT Press, v. 120, p. 185–192, 2018.

FINTELMAN, D. et al. A numerical investigation of the flow around a motorbike when subjected to crosswinds. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, v. 9, n. 4, p. 528–540, 2015.

FOUNDATION, O. *OpenFOAM User Guide - Wall Functions*. 2023. <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-turbulence-wallfunctions.html>.

GONZáLEZ-ARCOS, B. *Estudio del Diseño y Análisis de los Apéndices Aerodinámicos en MotoGP*. 2020. Bachelor's thesis.

GUERRERO, A.; CASTILLA, R. Aerodynamic study of the wake effects on a formula 1 car. *Energies*, v. 13, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en13195183>.

HEFT, A.; INDINGER, T.; ADAMS, N. *Experimental and Numerical Investigation of the DrivAer Model*. Rio Grande, PR, USA: [s.n.], 2012. v. 1. Evento realizado de 8–12 jul. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/FEDSM2012-72272>.

IDEIAS, B. com. *O Arduino funciona como uma balança? Sim! Ele é capaz! - Módulo HX711*. 2019. Vídeo do YouTube. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=-qLfybfvsHwt>. Acesso em: 12 jul. 2025.

KATZ, J. *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. [S.l.]: Bentley Publishers, 2006.

MARQUES, G. *Estudo de uma configuração de asa voadora usando o software de CFD OpenFOAM*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

NUMBERANALYTICS. *Streamlining CFD for Automotive Engineering*. 2025. <https://www.numberanalytics.com/blog/streamlining-cfd-automotive-engineering>. Acesso em: 21 ago. 2025.

PATANKAR, S. V. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. [S.l.]: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PUJOL, I. *Numerical simulations of the aerodynamics of a speedway motorcycle*. Dissertação (Mestrado) — Universitat Politècnica de Catalunya, 2025. Master's thesis.

SEDLAK, V. *Motorcycle Cornering Improvement: An Aerodynamical Approach based on Flow Interference*. Dissertação (Mestrado) — KTH Royal Institute of Technology, 2012. Master's thesis.

SIMSCALE. *What is y+ (yplus)?* 2024. <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-yplus/82394>. Acesso em: 17 jul. 2025.

STANDARDIZATION, I. O. for. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)*. [S.l.], 1995. Disponível em: <https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf>.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2. ed.. ed. Harlow: Pearson Education, 2007.

WILCOX, D. C. *Turbulence Modeling for CFD*. 3rd. ed. [S.l.]: DCW Industries, 2006.

WINSKI, R. et al. Comprehensive cfd aerodynamic simulation of a sport motorcycle. *Applied Sciences*, MDPI, v. 12, n. 20, p. 10130, 2022.

APÊNDICE A – Código Completo do Sistema de Aquisição

```
/*
     Q0481-Sketch-Calibrar
     AUTOR:   BrincandoComIdeias
*/

// INCLUSÃO DE BIBLIOTECAS
#include <HX711.h>

// DEFINIÇÕES DE PINOS
#define pinDT  2
#define pinSCK  3
#define pinBotao 4

// INSTANCIANDO OBJETOS
HX711 scale;

// DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS
float medida = 0;

void setup() {
  Serial.begin(57600);

  scale.begin(pinDT, pinSCK); // CONFIGURANDO OS PINOS DA BALANÇA
  scale.set_scale(-337809); // VALOR CALIBRADO PARA ESCALA

  delay(2000);
  scale.tare(); // ZERANDO A BALANÇA
  Serial.println("Balança Zerada");
}

void loop() {
  medida = scale.get_units(5); // MÉDIA DE 5 LEITURAS
```

```
  Serial.println(medida, 5); // EXIBE COM 5 CASAS DECIMAIS

  scale.power_down(); // DESLIGA O SENSOR
  delay(1000); // AGUARDA 1 SEGUNDO
  scale.power_up(); // RELIGA O SENSOR
}
```