

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**AMANDA PEREIRA CORDEIRO**

**ESTUDO DA AERODINÂMICA EM CARROS DE  
CORRIDA**

**Taubaté - SP  
2023**

**AMANDA PEREIRA CORDEIRO**

**ESTUDO DA AERODINÂMICA EM CARROS DE  
CORRIDA**

Trabalho de Graduação apresentado para  
obtenção do Certificado de Graduação do  
curso de Engenharia de Mecânica do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Taubaté.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Msc. Maria Regina  
Hidalgo de Oliveira Lindgren

Coorientador: Prof. Msc. Paulo Cesar  
Corrêa Lindgren

**Taubaté - SP  
2023**

**Grupo Especial de Tratamento da Informação - GETI**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBi**  
**Universidade de Taubaté - Unitau**

C794e Cordeiro, Amanda Pereira  
Estudo da aerodinâmica em carros de corrida / Amanda Pereira Cordeiro.  
-- 2023.  
75 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2023.

Orientação: Prof. Me. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren,  
Departamento de Engenharia Mecânica.

Coorientação: Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Design aerodinâmico. 2. Eficiência. 3. Carros de corrida. 4. Arrasto.  
5. Downforce. I. Universidade de Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. Graduação em Engenharia de Produção Mecânica. II. Título.

CDD – 658.5

**AMANDA PEREIRA CORDEIRO**

**ESTUDO DE AERODINÂMICA EM CARROS DE CORRIDA**

Trabalho de Graduação apresentado para obtenção do Certificado de Graduação do curso de **Engenharia Mecânica** do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

**DATA:** 30/11/2023

**RESULTADO:** APROVADO

**BANCA EXAMINADORA:**

Profª Me. Maria Regina Hidalgo O.Lindgren

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

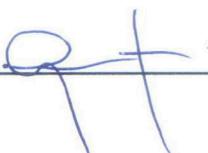
Prof. Me. Paulo Cesar Corrêa Lindgren

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Prof. Me. José Carlos Sávio de Souza

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Taubaté – SP  
2023

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, expresso meu mais profundo agradecimento a Deus e Nossa Senhora Maria por serem fontes de amor, força e orientação em minha vida. A presença constante Deles ilumina meus dias, inspira minha jornada e me concede a paz que transcende compreensão. Em momentos de alegria e desafio, sinto-me abençoada pela graça divina que permeia cada aspecto da minha existência.

Quero expressar minha profunda gratidão à minha querida mãe Rubia, sua presença amorosa e apoio inabalável moldaram quem sou hoje. Seu sacrifício, dedicação e ternura são fontes constantes de inspiração. Agradeço também ao meu padrasto Ricardo, pelo apoio e por enriquecer com amor nossa família.

Agradeço imensamente ao meu amado pai Marcelo. Sua presença constante em minha vida é um farol de sabedoria, coragem e apoio. Seu exemplo de trabalho árduo, integridade e amor moldou meu caráter de maneiras que transcenderam as palavras. Mesmo diante dos desafios, meu pai sempre foi um guia paciente e um mentor dedicado.

Gostaria ainda de expressar minha profunda gratidão ao meu irmão mais velho Lucas. Sua presença na minha vida é uma bênção que moldou muitos dos meus momentos mais significativos. Desde os conselhos sábios até o apoio incansável, ele tem sido um modelo inspirador. Seu comprometimento e seu instinto de proteção são um testemunho do vínculo especial que compartilhamos.

Quero expressar minha sincera gratidão à minha irmã mais nova e minha melhor amiga, Mariana. Sua presença ilumina meus dias com alegria e sua amizade é um tesouro que valorizo profundamente. Compartilhar risos, segredos e conquistas contigo torna cada experiência mais significativa. Agradeço por estar sempre comigo, por seu apoio caloroso e pela cumplicidade que vai além dos laços familiares. É um privilégio ter uma irmã tão incrível que não apenas enriquece minha vida, mas também a torna mais colorida e significativa.

A Universidade de Taubaté – UNITAU também merece meu agradecimento, pois disponibilizou seu ambiente, recursos e profissionais capacitados que desempenharam um papel crucial em minha formação acadêmica.

Um agradecimento especial à minha orientadora, Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren, por sua motivação, incentivo, atenção e valiosa troca de conhecimentos que foram indispensáveis na condução deste trabalho.

Expresso também minha gratidão ao professor coorientador Paulo Cesar Corrêa Lindgren e ao professor José Carlos Sávio de Souza, por prontamente aceitarem compor a banca examinadora e por contribuírem com conhecimentos essenciais para o meu desenvolvimento profissional.

*“Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor, que um dia você chega lá.  
De alguma maneira você chega lá.”*

*Ayrton Senna.*

## RESUMO

O objetivo dessa pesquisa é investigar o impacto do design aerodinâmico na eficiência e desempenho de carros de corrida. A metodologia utilizada envolveu testes práticos em condições controladas e simulações computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD). A pergunta que orientou a pesquisa foi: "Como ajustes na aerodinâmica podem influenciar a eficiência do combustível e o desempenho em corridas de carros de corrida?" Os resultados encontrados demonstram que modificações na aerodinâmica podem levar a melhorias significativas na eficiência do combustível e no desempenho em corridas, equilibrando a *downforce* e o arrasto de maneira ideal. A contribuição desta pesquisa reside na identificação da importância da aerodinâmica ativa e no destaque da necessidade de considerar a interação complexa entre os componentes aerodinâmicos e o fluxo de ar ao redor do veículo.

**Palavras-chave:** design aerodinâmico, eficiência, carros de corrida.

## RESUME

The aim of this research is to investigate the impact of aerodynamic design on the efficiency and performance of racing cars. The methodology used involved practical tests under controlled conditions and computational fluid dynamics (CFD) simulations. The question that guided the research was: "How can adjustments to aerodynamics influence fuel efficiency and performance in sprint car racing?" The results found demonstrate that modifications to aerodynamics can lead to significant improvements in fuel efficiency and racing performance, balancing downforce and drag optimally. The contribution of this research lies in identifying the importance of active aerodynamics and highlighting the need to consider the complex interaction between aerodynamic components and the airflow around the vehicle.

**Keywords:** aerodynamic design, efficiency, racing cars.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lotus 97T, primeira vitória de Senna na Fórmula 1, em 1985.....	4
Figura 2 - Alfa Romeo 158 em 1950, no primeiro ano de corrida da Fórmula 1.....	4
Figure 3 - Carro da Ferrari na Fórmula 1 em 2023.....	5
Figura 4 - Porsche 956, em 1980.....	6
Figura 5 - Toyota GT One competindo na Le Mans, em 1998.....	7
Figura 6 - Audi R8 LMP, competindo na Le Mans de 2000 até 2005.....	8
Figura 7 - Estudo da visão geral aerodinâmica do protótipo de carro de corrida...	9
Figura 8 - Ferrari 499P de Antonio Fuoco, competindo na Le Mans em 2023.....	10
Figura 9 - Variação de pressão estática sem aerofólio.....	18
Figura 10 - Variação de pressão estática com aerofólio.....	18
Figura 11 - Linhas de corrente ao redor de um aerofólio.....	20
Figura 12 - McLaren MP4/1 em 1981, primeiro chassis inteiramente feito em fibra de carbono.....	28
Figura 13 - Ação aerodinâmica em várias partes de um veículo de alta performance.....	32
Figura 14 - Asa traseira da Mercedes-AMG F1 W12, em 2021.....	35
Figura 15 - Asa dianteira da Mercedes-AMG F1 W12, em 2021.....	35
Figura 16 - Spoiler colocado em um carro da competição Nascar.....	36
Figura 17 - Difusor do carro Red Bull Racing RB18, em 2022.....	37
Figura 18 - Linhas de Fluxo com o DRS acionado.....	40
Figura 19 - Linhas de Fluxo com o DRS desativado.....	41
Figura 20 – Ford GT40 e Ferrari 330 P4 no grid de largada, em 1960.....	44
Figura 21 - Lótus 79 na Fórmula 1, em 1978.....	45

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Contextualização do Tema.....	1
1.2. Problema de Pesquisa.....	1
1.3. Objetivos .....	2
1.3.1. OBJETIVO GERAL .....	2
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
1.4. Justificativa.....	2
1.5. Breve Histórico da Evolução da Aerodinâmica em Carros de Corrida.....	3
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
2.1. Teoria de Aerodinâmica .....	11
2.1.1. Equações fundamentais da dinâmica dos fluidos aplicadas à aerodinâmica ...	12
2.1.2. Conceitos de fluxo laminar e turbulento.....	15
2.2. Arrasto Aerodinâmico .....	16
2.2.1. Fatores que influenciam o arrasto: área frontal, rugosidade da superfície e velocidade do veículo.....	19
2.2.2. Área Frontal .....	19
2.2.3. Rugosidade da Superfície .....	21
2.2.4. Velocidade do Veículo .....	22
2.2.5. Estratégias de Minimização de Arrasto.....	22
2.2.6. Coeficiente de arrasto e sua importância no design automotivo.....	23
2.2.7. Definição e Cálculo do Coeficiente de Arrasto.....	24
2.2.8. Importância do Coeficiente de Arrasto no Design Automotivo .....	25
2.2.9. Fatores que Influenciam o Coeficiente de Arrasto .....	26
2.2.10. Escolha de Materiais .....	27
2.2.11. Desafios e Considerações.....	28
2.2.12. Sustentabilidade e Inovações Futuras.....	29
2.2.13. Desafios e Inovações na Otimização do Coeficiente de Arrasto .....	30
2.3. <i>Downforce</i> .....	31

2.3.1. Explicação de como a downforce é gerada e seu efeito sobre a aderência do veículo. ....	33
2.3.2. Análise do papel dos componentes aerodinâmicos como asas, spoilers e difusores na geração de downforce.....	34
2.3.3. Relação entre downforce, pressão aerodinâmica e a performance do veículo em curvas e retas.....	37
2.4. Equilíbrio Aerodinâmico .....	38
2.5. Simulação e Modelagem .....	39
2.6. Influência da Aerodinâmica na Eficiência do Veículo .....	41
2.7. Impacto do Arrasto Aerodinâmico no Consumo de Combustível.....	42
2.8. Desenvolvimento Histórico do Estudo Aerodinâmico .....	43
2.9. Métodos de Análise e Testes .....	46
2.10. Desenvolvimento de Componentes Aerodinâmicos .....	47
2.11. Geração de <i>Downforce</i> e Estabilidade.....	48
3. METODOLOGIA DA PESQUISA.....	49
3.1. Fontes .....	49
3.2. Coleta de Dados.....	49
3.3. Análise e Interpretação dos Resultados .....	49
3.4. Discussão dos Resultados .....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	51
4.1. Análise Multidisciplinar .....	56
5. CONCLUSÕES.....	59
6. REFERÊNCIAS .....	61

## 1. INTRODUÇÃO

A engenharia automobilística é um campo que combina elementos de design, mecânica e eletrônica para criar veículos não apenas rápidos e eficientes, mas também seguros e confortáveis. Dentro deste domínio, a aerodinâmica emerge como um elemento crucial, particularmente no cenário das corridas de alta velocidade, onde cada fração de segundo conta e cada detalhe pode significar a diferença entre a vitória e a derrota. A aerodinâmica, estudada por engenheiros automotivos, visa compreender e otimizar a interação entre os veículos e o ar que os circunda. Este estudo busca explorar a complexidade desse relacionamento, visando aprimoramentos que possam levar a avanços significativos no desempenho dos carros de corrida.

### 1.1. Contextualização do Tema

No âmbito da engenharia automobilística, a aerodinâmica representa o estudo das forças do ar e de como elas interagem com as superfícies móveis. Em carros de corrida, essas forças são de suma importância, pois influenciam diretamente a velocidade e a estabilidade. Um veículo aerodinamicamente otimizado pode cortar o ar com maior eficiência, reduzir o arrasto e melhorar a aderência à pista através da *downforce*, fatores que juntos, incrementam a performance em competições.

### 1.2. Problema de Pesquisa

O principal problema que o estudo da aerodinâmica procura resolver é como reduzir o arrasto aerodinâmico - a resistência do ar - ao mesmo tempo em que se maximiza a *downforce*, a força que pressiona o carro contra a pista, sem comprometer a eficiência do combustível e a capacidade de manobra do veículo. O desafio reside em equilibrar esses elementos contraditórios de uma maneira que se adapte a diferentes circuitos e condições de corrida.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste estudo é desenvolver um entendimento mais aprofundado da aerodinâmica em carros de corrida, proporcionando visões que possam levar a avanços no design e na engenharia de veículos de alta performance, com o fim de melhorar a eficiência, a segurança e os resultados em competições.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Os objetivos específicos incluem:

1. Analisar as forças aerodinâmicas atuantes em carros de corrida e como elas afetam o desempenho.
2. Investigar as técnicas e tecnologias atuais usadas para minimizar o arrasto aerodinâmico e maximizar a *downforce*.
3. Estudar a evolução histórica dos designs aerodinâmicos em carros de corrida e como essas mudanças influenciaram o desempenho.
4. Propor inovações no design aerodinâmico que possam ser testadas em túneis de vento e simulações computacionais.

### **1.1. Justificativa**

A justificativa para este estudo é multifacetada. Primeiramente, há um interesse contínuo em melhorar a segurança dos pilotos e a competitividade das corridas. Além disso, os avanços em aerodinâmica muitas vezes têm aplicações além do automobilismo, influenciando o design e a eficiência de veículos de consumo e contribuindo para a sustentabilidade ambiental. Economicamente, a otimização aerodinâmica pode resultar em economia de combustível e, conseqüentemente, em custos operacionais mais baixos. Por fim, há um valor acadêmico e prático em expandir o conhecimento humano sobre as leis da física aplicadas ao design automotivo.

#### 1.4. Breve Histórico da Evolução da Aerodinâmica em Carros de Corrida

A história da aerodinâmica em carros de corrida, conforme delineada por diversos estudiosos e pesquisadores, é uma narrativa de inovação e evolução contínua. Inicialmente, nas primeiras décadas do automobilismo, o impacto da aerodinâmica no desempenho dos veículos era pouco compreendido (MOREIRA, 2015). Entretanto, com o passar do tempo, surgiram inovações significativas que alteraram o curso do design de carros de corrida.

Carrocerias mais baixas e lisas foram introduzidas para cortar o ar de forma mais eficiente, um conceito que começou a ganhar força nas décadas iniciais do século XX (FONTANELLA *et al.*, 2019). Na década de 1960, a experimentação com asas e spoilers para criar *downforce* marcou um ponto de virada (COELHO, 2000). Estes componentes não só melhoraram a aderência dos carros à pista, mas também revolucionaram o design dos carros de corrida, permitindo curvas mais rápidas e maior estabilidade a altas velocidades.

As inovações continuaram nas décadas seguintes, com o desenvolvimento de difusores, asas móveis e outros componentes aerodinâmicos sofisticados (MARQUES, 2017). Estes avanços foram impulsionados, em grande parte, por progressos na simulação computacional e técnicas de teste em túneis de vento, que permitiram um entendimento mais profundo da aerodinâmica (SOARES, 2013; RECH, 2023).

Este estudo busca construir sobre este legado, explorando as mais recentes inovações em aerodinâmica automobilística. A pesquisa contínua é impulsionada pela crescente complexidade e velocidade nas corridas, destacando a importância da aerodinâmica como um campo vibrante e essencial na engenharia automobilística moderna (LISBOA, 2021). A necessidade de desenvolver novas técnicas e conhecimentos para impulsionar a próxima geração de carros de corrida aerodinâmicos continua a ser um desafio e uma oportunidade para engenheiros e designers, como exemplificado às figuras 1, 2 e 3.

**Figura 1** - Lotus 97T, primeira vitória de Senna na Fórmula 1, em 1985.



LOPES, Rafael. Para Montar: A Clássica Lótus 97T da Primeira Vitória de Ayrton Senna na F1.  
**Globo Esporte**. 2021.

**Figura 2** - Carro da Maserati na Fórmula 1 em 1950, no primeiro ano de corrida da Fórmula 1.



Fórmula 1 1950. Site **Old Racing Cars**.

**Figure 3** - Carro da Ferrari na Fórmula 1 em 2023.



CURTY, Gabriel. Site **Grande Prêmio**. 2023.

Um caso muito interessante é que, na década de 1980, na era dos Protótipos de Le Mans (Le Mans Prototypes - LMP), como exemplifica a figura 4, a abordagem aerodinâmica era fundamentada em um "*front underwing*", um conceito que mais tarde foi adotado nas corridas de GT com a utilização de *front-ends* fechados. Em essência, o *front-end* representa um dispositivo aerodinâmico que manipula o fluxo de ar, alterando a pressão nas proximidades dos arcos das rodas. Essa configuração envolve a criação de uma área de baixa pressão na parte superior e geração de downforce na dianteira do veículo. Como resultado, os LMP da década de 1980 eram particularmente sensíveis às variações na altura do passeio, o que contribuiu para inúmeras situações de decolagem ocorridas com esses carros (DIAS, 2023).

Figura 4 - Porsche 956, em 1980.



SANTI, Michael. **RM Auctions puts a Porsche 956 Group C Le Mans Prototype on sale.** 2014.

No final da década de 1990, a Toyota introduziu uma inovação significativa ao adotar o primeiro "*front-end*" como um sistema aberto, como a figura 5. Esse conceito permite que o ar passe pelo divisor dianteiro e saia pela parte inferior da asa dianteira através das laterais do carro. Essa abordagem implica uma condição de saída do ar menos dependente da altura do passeio, já que a pressão que atua nas laterais do carro permanece constante. Isso significa que, se a altura dianteira (FRH) aumentar ligeiramente, como é comum durante os movimentos normais na pista, o ar não se acumulará como um "*airbag*" abaixo da asa dianteira e do assoalho, graças à evacuação nos *sidepods* do carro. Essa configuração reduz a sensibilidade à altura do piso. A principal melhoria proporcionada pelo *front-end* aberto foi no desempenho. Com uma dependência reduzida da distância ao solo, o carro torna-se mais previsível e fácil de dirigir. Não há transferência significativa de equilíbrio aerodinâmico durante frenagem e aceleração, resultando em maior dirigibilidade. Embora a questão de segurança tenha sido melhorada, a verdadeira revolução do *front-end* aberto reside na dirigibilidade do carro. No caso de carros GT, embora a sensibilidade à altura do passeio seja o dobro dos LMP, isso não é tanto uma questão de segurança, mas sim de desempenho. Devido à menor velocidade dos carros GT, isso não se torna tão crítico. Para os carros LMP, a adoção do *front-end* aberto

representou um grande avanço em termos de segurança e desempenho, facilitando a dirigibilidade desses veículos (DIAS, 2023).

**Figura 5** - Toyota GT One competindo na Le Mans, em 1998.



**Livery of the Day – Toyota GT-One 1998.** Site: Livery Blog. 2016.

Nos primeiros anos de 2000, emerge um conceito inovador: os corpos divididos. Nele, a parte dianteira aberta, conhecida como *underwing*, mantém a evacuação do ar direcionada para as laterais do veículo, conforme o padrão convencional, como exemplifica a figura 6. No entanto, ela conduz o fluxo de ar para um perfil adicional posicionado atrás das rodas traseiras. Esse conceito assemelha-se aos carros de roda aberta, uma vez que a montagem dianteira é independente, tanto física quanto aerodinamicamente, do restante do automóvel. O intuito é criar uma separação entre a parte inferior da asa dianteira e o corpo traseiro do veículo. Isso resulta em aprimoramentos significativos em *downforce* (força descendente) e estabilidade. Embora os carros LMP (Le Mans Prototype) tenham se tornado mais previsíveis, eles ainda mantinham uma asa inferior plana. Como resultado, a sensibilidade a rolagem e guinada permanecia presente. Essa questão tornou-se ainda mais evidente após um acidente durante um dos testes realizados pela Audi para seu carro R8 LMP. Após o incidente, a Audi e o Technical Working Group (TWG) dedicaram-se intensamente a testes de túnel de vento utilizando modelos do R8. (DIAS, 2023).

Consequentemente, observou-se que os carros LMP com *underwing* plano experimentam mudanças rápidas na *downforce*, alternando rapidamente

entre *downforce* e levantamento. Essa dinâmica é especialmente evidente quando o veículo está sujeito a ângulos simultâneos de guinada e rolagem. Nessas circunstâncias, a placa plana não conseguiu impedir que o fluxo de ar lateral provocasse a elevação do chassi (DIAS, 2023).

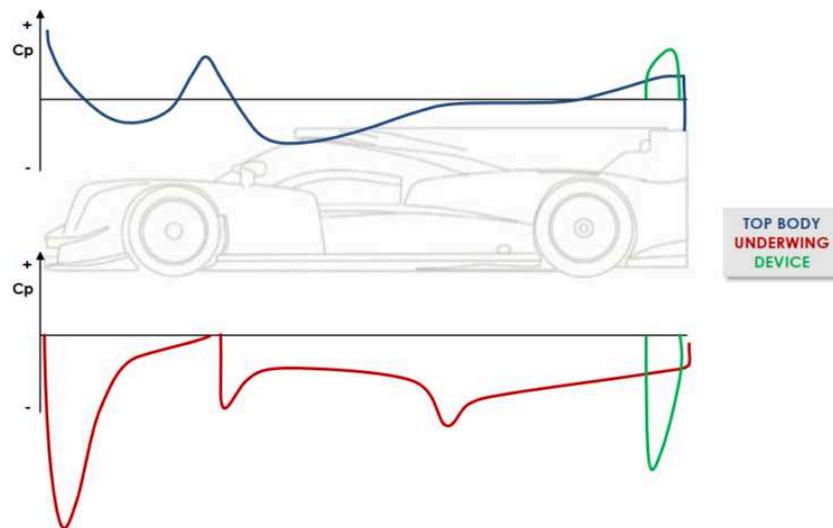
**Figura 6** - Audi R8 LMP, competindo na Le Mans de 2000 até 2005.



**Audi's R8 LMP Le Mans Winner Sounds Ridiculous.** Site: Road Track. 2018.

A figura 7, a seguir, oferece uma visão geral da aerodinâmica do protótipo de carro de corrida. Conforme evidenciado, o coeficiente de pressão (CP) mais proeminente é alcançado na parte inferior da asa dianteira. Devido ao seu valor negativo, isso indica a presença de *downforce*. Uma substancial geração de *downforce* é notável na região frontal, enquanto tanto a placa plana quanto o difusor traseiro contribuem para um aumento significativo com relativa estabilidade. O componente mencionado se refere à asa traseira, a qual proporciona um notável *downforce*, embora com algum arrasto. Uma característica intrigante na parte superior do corpo é que algumas áreas exibem  $CP = 0$ , indicando neutralidade na pressão. No entanto, há regiões que geram *downforce*, como aquelas relacionadas às ranhuras dianteiras, enquanto as cavas das rodas resultam em uma geração de elevação. (DIAS, 2023)

**Figura 7** - Estudo da visão geral aerodinâmica do protótipo de carro de corrida.



DIAS, Anderson Luiz. **Desenvolvimento aerodinâmico dos carros de corrida da categoria prototype e hypercars**. 2023.

Em análise, pode-se concluir que o desenvolvimento aerodinâmico contínuo dos carros de corrida na categoria representa uma busca incessante pela otimização do desempenho nas pistas. Ao longo do tempo, os engenheiros têm refinado meticulosamente cada componente aerodinâmico, desde as asas dianteiras até os difusores traseiros, em busca do equilíbrio perfeito entre *downforce* e arrasto. A busca por maior eficiência, estabilidade e velocidade máxima é evidente na evolução das abordagens, desde o uso de *underwings* até corpos divididos. A compreensão detalhada das interações complexas entre o ar e as superfícies do carro permitiu não apenas aumentar a força descendente para melhor aderência, mas também mitigar os efeitos adversos do arrasto. Em última análise, essa incessante inovação aerodinâmica não só elevou os padrões de desempenho nas corridas, mas também ressaltou a importância da engenharia de ponta na busca pela excelência no cenário altamente competitivo das corridas de protótipos e *hypercars*.

**Figura 8** - Ferrari 499P de Antonio Fuoco, competindo na Le Mans em 2023.



PATTNI, Vijay. **Le Mans 2023 Qualifying: Ferrari draws first blood with 1-2 for Hyperpole shootout.** 2023.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo de Fundamentação Teórica é dedicado ao exame dos conceitos essenciais que compõem a espinha dorsal da aerodinâmica aplicada à engenharia automobilística. Através da dissecção de princípios como o arrasto aerodinâmico e a *downforce*, busca-se estabelecer uma compreensão robusta das forças que regem o comportamento de veículos em altas velocidades. Uma revisão meticulosa da literatura permite não só reconhecer as contribuições passadas, mas também identificar lacunas que direcionam para futuras inovações. Este capítulo revisita estudos anteriores que moldaram a jornada evolutiva do design automotivo, enfatizando a constante busca pela otimização aerodinâmica para um desempenho superior.

### 2.1. Teoria de Aerodinâmica

A aerodinâmica, um ramo crítico da dinâmica dos fluidos, é essencial na engenharia automobilística, especialmente na otimização do desempenho e eficiência de carros de corrida (HEWITT, 2023). Esta área de estudo investiga a interação entre gases, particularmente o ar, e corpos sólidos em movimento. Para compreender estas interações, é fundamental iniciar com as propriedades dos fluidos e suas implicações na teoria aerodinâmica.

Fluidos, substâncias que podem fluir e se adaptar à forma de seus recipientes, desempenham um papel central na aerodinâmica. O ar, apesar de sua natureza molecular discreta, é tratado como um fluido contínuo, permitindo a aplicação de princípios matemáticos e físicos para prever e analisar seu comportamento em torno de veículos em alta velocidade (MARQUES, 2017).

A densidade dos fluidos, definida como a massa por unidade de volume, é uma propriedade fundamental. No caso do ar, sua densidade varia com a altitude e a temperatura, influenciando diretamente a aerodinâmica de um carro de corrida (WINDLIN *et al.*, 2012). Altitudes maiores ou temperaturas elevadas, que diminuem a densidade do ar, podem resultar em menos interações moleculares com a superfície do veículo, afetando o arrasto aerodinâmico e a *downforce*.

A viscosidade, que indica a resistência de um fluido ao escoamento, é outra propriedade crucial. A baixa viscosidade do ar facilita seu fluxo ao redor das superfícies, mas também pode gerar fluxos laminares e turbulentos, impactando significativamente o desempenho aerodinâmico de um carro (COIMBRA, 2018). Enquanto o fluxo laminar é ordenado, o fluxo turbulento é caótico e pode aumentar o arrasto, embora também possa contribuir para um maior *downforce*.

A pressão dos fluidos é igualmente crítica na aerodinâmica. Engenheiros projetam carros de corrida para maximizar diferenças de pressão, criando *downforce* e melhorando a tração, o que permite velocidades mais altas em curvas (SAKAI, 2018).

Ademais, a temperatura e a umidade do ar influenciam seu comportamento aerodinâmico. Ar mais quente, menos denso e com menor viscosidade, pode reduzir o arrasto, enquanto a umidade adiciona peso ao ar, afetando tanto o arrasto quanto a *downforce* (MOREIRA, 2015).

Finalmente, a compressibilidade do ar, ou seja, a variação de sua densidade com a pressão, torna-se relevante em velocidades próximas ou superiores à velocidade do som. Em altas velocidades, como em corridas de protótipos ou com sistemas de propulsão assistida, essa propriedade torna-se crucial (MENEXES *et al.*, 2019).

A teoria da aerodinâmica baseia-se nesse entendimento das propriedades dos fluidos para desenvolver modelos e simulações que auxiliam na concepção de veículos mais rápidos, seguros e eficientes. Compreendendo o comportamento do ar e sua reação a superfícies em alta velocidade, engenheiros podem explorar estas propriedades para alcançar desempenhos anteriormente inatingíveis, impulsionando a evolução no design de carros de corrida (MARQUES, 2017).

### 2.1.1. EQUAÇÕES FUNDAMENTAIS DA DINÂMICA DOS FLUIDOS APLICADAS À AERODINÂMICA

No estudo da aerodinâmica aplicada a veículos em movimento, as equações fundamentais da dinâmica dos fluidos desempenham um papel crucial, atuando como ferramentas essenciais para desvendar o comportamento do ar (HEWITT, 2023). Essas equações matemáticas são fundamentais para que

os engenheiros compreendam e apliquem as leis que regem tanto os céus quanto as pistas de corrida.

A equação da continuidade, que serve como base para a conservação da massa em aerodinâmica, estabelece que o produto da densidade do ar, sua velocidade e a área de seção transversal permanecem constante em um fluxo. Esta equação é adaptada para considerar o ar como um fluido compressível, o que é crucial para entender como variações na densidade do ar influenciam a performance dos carros em diferentes altitudes e velocidades (MARQUES, 2017).

As complexas equações de Navier-Stokes, que levam em conta as forças viscosas, são fundamentais para modelar comportamentos de fluxo mais intrincados, como fluxos turbulentos e laminar. Essas equações permitem aos engenheiros entender como a superfície de um carro de corrida influencia o fluxo do ar, criando padrões que maximizem a eficiência e a *downforce* (COIMBRA, 2018).

A equação de Bernoulli, ressaltando a conservação da energia em um fluxo de fluido, estabelece uma relação inversa entre pressão e velocidade do ar. Esse princípio é crucial no design de asas e spoilers, que são moldados para criar variações de pressão que resultam em *downforce* (SAKAI, 2018).

A equação de Bernoulli pode ser dada pela seguinte equação (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2010):

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + gz_2$$

Onde,

p: pressão do fluido;

V: velocidade do fluido;

z: altura relativa;

g: aceleração da gravidade;

ρ: densidade do fluido.

Nos aerofólios, quando o fluxo de ar passa sobre eles, um vórtice se forma em sua região traseira. Este vórtice, movendo-se no sentido anti-horário, induz

a criação de um contrafluxo no sentido horário, equilibrando o momento angular do corpo. Ao realizar uma simples soma vetorial do fluxo principal e do contrafluxo, observa-se que, na parte superior, eles se reforçam, enquanto, na parte inferior, se anulam mutuamente. Como resultado, os vetores resultantes são mais significativos na parte superior, levando a velocidades do ar superiores na região superior em comparação com a inferior. Esse fenômeno resulta em uma diminuição da pressão na parte superior do aerofólio, gerando, conseqüentemente, uma força de sustentação para cima. Nos aerofólios automotivos, esse processo ocorre, mas com a direção oposta, resultando em uma força para baixo conhecida como *downforce* (MAIA, 2015).

Para situações onde a viscosidade é menos relevante, as equações de Euler fornecem uma visão simplificada, porém poderosa, do fluxo de fluidos ideais, úteis nas fases iniciais do design aerodinâmico (MOREIRA, 2015).

O teorema de Kutta-Joukowski, no contexto das asas, estabelece que a sustentação gerado por uma asa está diretamente relacionada à circulação do fluxo de ar que ela induz, um princípio fundamental no design de asas de carros de corrida para gerar a *downforce* necessária (MENEZES *et al.*, 2019).

O teorema de Kutta-Joukowski é um princípio fundamental na teoria aerodinâmica de asas. Esse teorema estabelece uma relação entre a circulação ao redor de uma asa e a força de sustentação que ela gera. (ANDERSON, 2010).

O teorema afirma que a força de sustentação por unidade de comprimento de uma asa em um escoamento incompressível e irrotacional é proporcional à circulação ao redor da asa. A circulação é uma grandeza que descreve a rotação ou o movimento de "girar" do fluido ao redor da asa (ANDERSON, 2010).

Matematicamente, o teorema de Kutta-Joukowski pode ser expresso pela seguinte equação (ANDERSON, 2010):

$$L' = \rho \cdot V_{\infty} \cdot \Gamma$$

Onde,

L': força de sustentação por unidade de comprimento,

$\rho$ : densidade do fluido,

V: velocidade do fluido,

$\Gamma$ : circulação ao redor da asa.

Este teorema é fundamental para entender como as asas geram sustentação. Ele foi derivado para escoamentos potenciais (que são aproximadamente válidos para escoamentos de baixo número de Mach), e é frequentemente utilizado em teorias simplificadas de aerodinâmica, como a teoria dos elementos finitos para asas finitas (ANDERSON, 2010).

Por fim, as equações de conservação de energia são essenciais para entender as interações energéticas que ocorrem quando um carro de corrida desloca o ar, fundamentais para análises de aquecimento aerodinâmico e estratégias de eficiência energética (WINDLIN *et al.*, 2012).

Estas equações são aplicadas em modelos computacionais avançados e simulações, que são posteriormente testados em túneis de vento, permitindo que os engenheiros refinem o design dos veículos de corrida em busca de maior velocidade e eficiência.

### 2.1.2. CONCEITOS DE FLUXO LAMINAR E TURBULENTO

A compreensão dos conceitos de fluxo laminar e turbulento é essencial na aerodinâmica, particularmente no design de carros de corrida, onde a gestão do fluxo de ar ao redor do veículo tem um impacto significativo na eficiência e na performance (MARQUES, 2017). Estes dois tipos de fluxo representam estados distintos pelos quais o ar passa ao interagir com as superfícies do carro, influenciando de maneira crucial o comportamento aerodinâmico do veículo.

O fluxo laminar, caracterizado por camadas de ar que deslizam suavemente uma sobre a outra em trajetórias paralelas, ocorre a baixas velocidades ou em superfícies lisas e aerodinamicamente otimizadas. Este tipo de fluxo é preferido no design de carros de corrida devido à sua capacidade de reduzir o arrasto aerodinâmico (HEWITT, 2023).

Em contrapartida, o fluxo turbulento, mais caótico e energético, com camadas de ar misturando-se em diferentes velocidades e direções, é menos eficiente em termos de arrasto aerodinâmico. No entanto, sua capacidade de aderir melhor à superfície do veículo o torna crucial para manter a sustentação aerodinâmica, ou *downforce*, especialmente em altas velocidades ou em superfícies com curvaturas acentuadas (COIMBRA, 2018).

O número de Reynolds é uma medida adimensional que ajuda a determinar em que ponto o fluxo laminar se tornará turbulento. Ele relaciona a densidade do ar, a velocidade do fluido, a viscosidade e uma dimensão característica do corpo. Quando o número de Reynolds excede um valor crítico, é provável que o fluxo se torne turbulento (SAKAI, 2018).

Engenheiros de aerodinâmica trabalham com esses dois regimes de fluxo ao projetar carros de corrida, buscando otimizar o fluxo de ar para equilibrar cuidadosamente o arrasto e a *downforce*. Eles utilizam a análise computacional de fluidos (CFD) e testes em túneis de vento para visualizar e medir o fluxo laminar e turbulento, ajustando o design para maximizar a eficiência aerodinâmica (MOREIRA, 2015).

Outrossim, superfícies específicas podem ser tratadas ou projetadas para promover um regime de fluxo desejado, como a utilização de *vortex generators* para induzir turbulência controlada onde benéfica (MENEZES *et al.*, 2019).

O estudo do fluxo laminar e turbulento não se limita a veículos terrestres, encontrando aplicações em outras áreas da engenharia, como na aviação. O entendimento desses conceitos é fundamental para o design de carros de corrida de alto desempenho, permitindo aos engenheiros criar veículos que não só cortam o ar com eficiência, mas também utilizam o ar como uma ferramenta para aumentar a aderência e a estabilidade.

## 2.2. Arrasto Aerodinâmico

O arrasto aerodinâmico, um fenômeno físico essencial na aerodinâmica, especialmente na engenharia automobilística aplicada a carros de corrida, representa a resistência do ar ao movimento de um corpo através dele. Esta resistência é um desafio crítico no contexto da busca incessante por velocidade e eficiência, tornando-se um pilar fundamental no design de veículos competitivos (HEWWIT, 2023).

Em alta velocidade, um veículo enfrenta a resistência do ar, contraproducente à propulsão, exigindo mais energia ou potência para manter a mesma velocidade. Engenheiros de corrida utilizam várias técnicas para reduzir o arrasto e melhorar a performance (MARQUES, 2017).

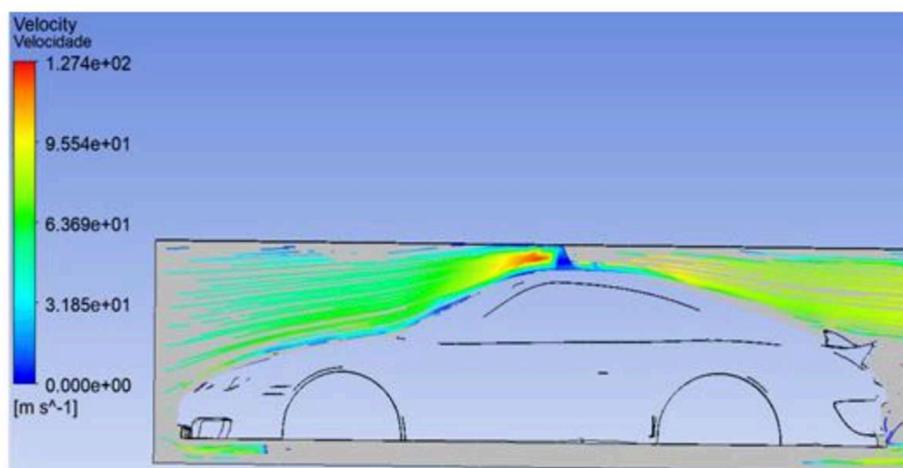
O arrasto pode ser dividido em componentes como arrasto de fricção, arrasto de forma e arrasto induzido. O arrasto de fricção surge do contato do ar com a superfície do veículo, enquanto o arrasto de forma resulta da diferença de pressão entre a frente e a traseira do veículo. O arrasto induzido ocorre em objetos com asas, relacionado à formação de vórtices nas pontas das asas (COIMBRA, 2018).

Para minimizar o arrasto, o conceito de coeficiente de arrasto é empregado, considerando a forma do veículo, a área da seção transversal e as condições do fluxo de ar (SAKAI, 2018). O design aerodinâmico é um processo iterativo que começa com simulações computacionais e modelagem em CFD, seguidos por testes em túneis de vento e na pista de corrida.

Encontrar o equilíbrio entre arrasto e *downforce* é crucial. Um veículo com baixo arrasto, mas *downforce* insuficiente, pode não ter a aderência necessária para acelerar nas curvas. Por outro lado, muita *downforce* pode tornar o veículo resistente ao movimento linear, diminuindo a velocidade máxima (MOREIRA, 2015).

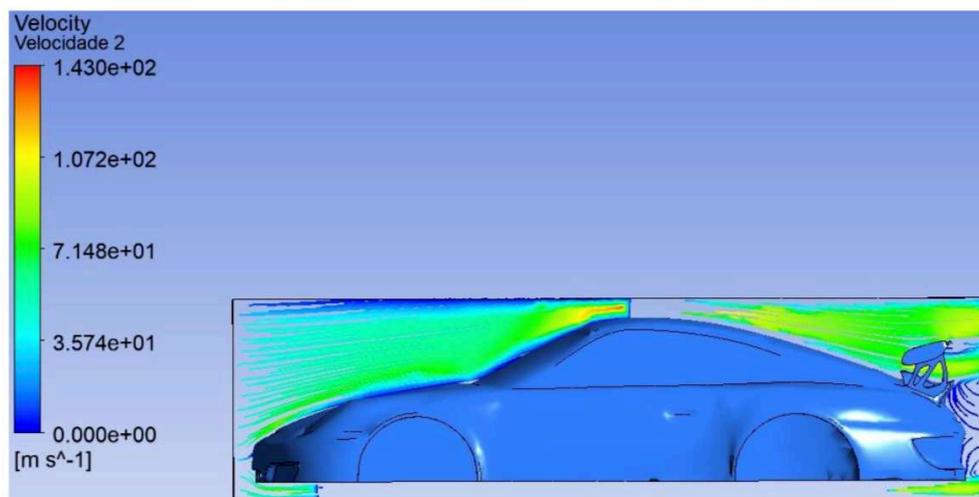
O aerofólio de um carro desempenha um papel fundamental na aerodinâmica do veículo, influenciando diretamente o coeficiente de arrasto. O coeficiente de arrasto é uma medida que expressa a resistência que um objeto enfrenta ao se mover através do ar. O design e a inclinação do aerofólio são cruciais para otimizar essa resistência aerodinâmica. Um aerofólio bem projetado pode reduzir o Cd, minimizando a turbulência e a pressão de arrasto. Isso não apenas melhora a eficiência do combustível, reduzindo o consumo, mas também contribui para uma melhor estabilidade e aderência do veículo em altas velocidades. Assim, a relação entre o aerofólio do carro e o coeficiente de arrasto destaca a importância do design aerodinâmico na eficiência e desempenho global do veículo, especialmente em termos de economia de combustível e dinâmica de condução.

**Figura 9** - Variação de pressão estática sem aerofólio.



MEYER, Guilherme de Oliveira; LEVANDOWSKI, Luís Guilherme; FERREIRA, Matheus Taschner Panelli. Análise de Simulações Aerodinâmica em Carroceria Veicular Com e Sem Aerofólio. **Universidade Positivo**. 2021.

**Figura 10** - Variação de pressão estática com aerofólio.



MEYER, Guilherme de Oliveira; LEVANDOWSKI, Luís Guilherme; FERREIRA, Matheus Taschner Panelli. Análise de Simulações Aerodinâmica em Carroceria Veicular Com e Sem Aerofólio. **Universidade Positivo**. 2021.

Na ausência do aerofólio, espera-se que o arrasto seja menor do que na segunda configuração. Após a introdução de um componente aerodinâmico, a velocidade diminui na parte superior e aumenta na região inferior, devido à configuração de uma asa invertida com uma inclinação específica. Isso resulta

na geração de uma força de sustentação negativa, direcionada para o solo (MEYER, 2021)

A rugosidade da superfície também é uma estratégia para reduzir o arrasto. Superfícies lisas favorecem o fluxo laminar, menos resistente ao movimento do que o fluxo turbulento. Contudo, a turbulência controlada pode ser benéfica em certas áreas do veículo, ajudando a manter o fluxo de ar aderido à superfície (MENEZES *et al.*, 2019).

Inovações em materiais e tecnologias contribuem significativamente para a redução do arrasto, permitindo a construção de formas aerodinâmicas mais eficientes e o uso de revestimentos e tratamentos de superfície para alterar a interação do ar com a carroceria do carro (WINDLIN *et al.*, 2012).

O estudo do arrasto aerodinâmico é fundamental na engenharia de carros de corrida, onde o sucesso nas pistas depende da eficiência com que um veículo negocia as forças de resistência do ar. Os engenheiros buscam continuamente avançar no conhecimento aerodinâmico, aprimorando a interação entre o ar e a máquina em busca de perfeição em alta velocidade.

### **2.2.1. FATORES QUE INFLUENCIAM O ARRASTO: ÁREA FRONTAL, RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE E VELOCIDADE DO VEÍCULO.**

O arrasto aerodinâmico é uma força de resistência que todo objeto em movimento encontra ao se deslocar através do ar. No mundo da engenharia automobilística e, mais especificamente, no design de carros de corrida, a compreensão e a otimização do arrasto aerodinâmico são essenciais para alcançar o desempenho máximo. Diversos fatores influenciam o arrasto, incluindo a área frontal do veículo, a rugosidade de sua superfície e a velocidade com que se desloca. Este texto discorre sobre como cada um desses fatores afeta o arrasto aerodinâmico e as estratégias utilizadas para minimizá-lo.

### **2.2.2. ÁREA FRONTAL**

A área frontal de um veículo, que representa o primeiro ponto de contato com o ar, desempenha um papel crucial na aerodinâmica, especialmente em

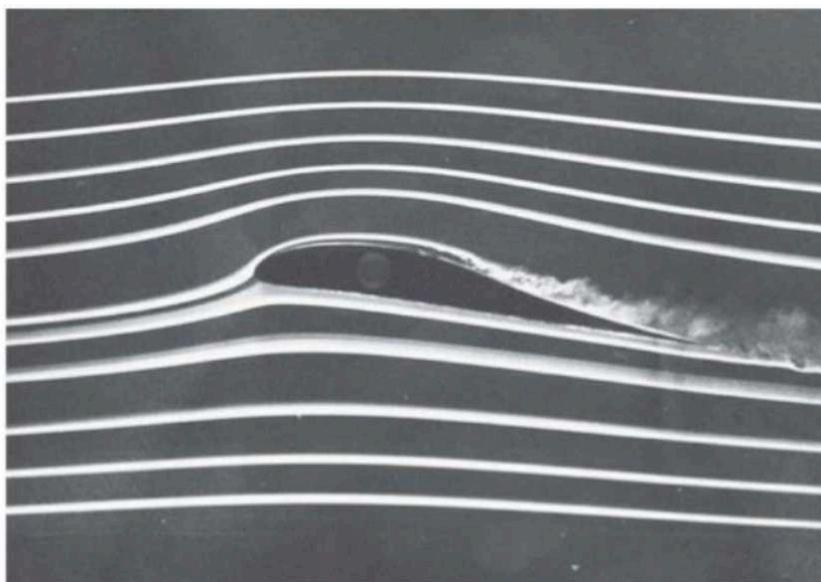
carros de corrida (BIRRENTO, 2008). Quanto maior a área frontal, maior a quantidade de ar deslocado e, conseqüentemente, maior o arrasto aerodinâmico. Portanto, a otimização da área frontal é uma preocupação central no design de veículos de alta performance.

No design de carros de corrida, a área frontal é meticulosamente projetada para ser o mais aerodinâmica possível. Engenheiros buscam designs mais estreitos e baixos para reduzir essa área, diminuindo assim o arrasto. No entanto, essa redução não deve comprometer o espaço necessário para componentes vitais, como o motor e dispositivos de *downforce*, como aerofólios e difusores (BORSATTI, 2010).

A utilização de simulações computacionais e túneis de vento é frequente nesse processo, permitindo aos engenheiros testar diferentes configurações de área frontal. Esses testes visam encontrar um design que ofereça um equilíbrio ótimo entre baixo arrasto e funcionalidade aerodinâmica, garantindo que o veículo possa cortar o ar com a menor resistência possível (COELHO, 2000).

O objetivo é criar uma “bolha” de ar, como exemplifica a figura 11, ao redor do veículo, que permita um movimento fluido e eficiente através do ar, mantendo os aspectos cruciais do design do carro, como a estabilidade e a *downforce* necessárias para o desempenho em pistas de corrida (RECH, 2023).

**Figura 11** - Linhas de corrente ao redor de um aerofólio.



### 2.2.3. RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE

A interação entre a rugosidade da superfície de um veículo e o tipo de fluxo de ar que ela induz é um aspecto crucial na aerodinâmica, especialmente em carros de corrida (BORSATTI, 2010). A rugosidade da superfície pode influenciar significativamente se o fluxo de ar ao redor do veículo será laminar ou turbulento, cada um com implicações distintas para o desempenho aerodinâmico.

Superfícies lisas favorecem o fluxo laminar, caracterizado por um movimento de ar suave e ordenado, que geralmente resulta em menor arrasto, que decorre porque o fluxo laminar possui menos agitação e turbulência, oferecendo menor resistência ao movimento do veículo (MENEZES *et al.*, 2019).

No entanto, superfícies ásperas tendem a promover o fluxo turbulento. Embora o fluxo turbulento adira melhor à superfície do veículo, aumentando a *downforce*, ele também resulta em maior arrasto devido à sua natureza caótica e misturada (MARQUES, 2017).

A relação entre rugosidade e arrasto é complexa e depende do contexto específico. Em algumas áreas do veículo, uma pequena quantidade de rugosidade pode ser benéfica. Por exemplo, os geradores de vórtices, que são pequenas aletas colocadas em áreas estratégicas, podem criar turbulência controlada. Essa turbulência ajuda a manter o fluxo de ar aderente à superfície do carro, prevenindo a separação do fluxo, que pode aumentar drasticamente o arrasto (SAKAI, 2018).

Além disso, a aplicação de texturas específicas em certas partes do veículo pode ser utilizada para manipular o fluxo de ar de maneira desejada. Essa manipulação permite aos engenheiros otimizar o desempenho aerodinâmico, equilibrando o arrasto e a *downforce* (COIMBRA, 2018).

Portanto, a rugosidade da superfície de um veículo é um fator importante no design aerodinâmico, e sua otimização requer uma compreensão detalhada das interações entre a superfície do veículo e o fluxo de ar.

#### 2.2.4. VELOCIDADE DO VEÍCULO

A relação entre a velocidade do veículo e o arrasto aerodinâmico é um aspecto central da aerodinâmica, especialmente relevante no contexto de carros de corrida (BIRRENTTO, 2008). À medida que a velocidade do veículo aumenta, o arrasto aerodinâmico também aumenta, e não de maneira linear, mas exponencialmente, implicando em incrementos relativamente pequenos na velocidade podem resultar em aumentos significativos no arrasto, exigindo mais energia para manter ou aumentar essa velocidade.

Em carros de corrida, onde as altas velocidades são frequentes, compreender e gerenciar eficazmente o arrasto torna-se um desafio crucial. Pilotos e engenheiros precisam trabalhar em conjunto para desenvolver estratégias que otimizem o desempenho aerodinâmico. Os pilotos devem saber quando tirar proveito da aerodinâmica para ganhar velocidade e quando é mais prudente minimizar o arrasto para economizar combustível (COIMBRA, 2018).

Do ponto de vista do design, os engenheiros enfrentam o desafio de equilibrar a necessidade de *downforce*, que aumenta a aderência do veículo à pista, com o aumento de arrasto associado às altas velocidades. A *downforce* é essencial para manter a estabilidade do carro nas curvas, mas seu incremento muitas vezes resulta em maior arrasto aerodinâmico (MARQUES, 2017).

Portanto, a gestão do arrasto em altas velocidades é uma questão de equilibrar cuidadosamente vários fatores. A eficiência aerodinâmica não se resume apenas ao design do veículo, mas também às táticas empregadas na pista. Essa complexa interação entre velocidade, arrasto e *downforce* é o que muitas vezes determina o sucesso ou o fracasso em competições automobilísticas de alto nível (SAKAI, 2018).

#### 2.2.5. ESTRATÉGIAS DE MINIMIZAÇÃO DE ARRASTO

Para enfrentar os desafios relacionados ao arrasto aerodinâmico em carros de corrida, os engenheiros adotam uma série de estratégias inovadoras e eficientes. O design da carroceria é fundamental e é otimizado para criar o perfil mais eficiente possível, envolvendo o uso de materiais leves e a modelagem de formas que reduzem a área frontal e promovem um fluxo de ar

mais favorável. Esses materiais e formas são selecionados não apenas pela sua eficiência aerodinâmica, mas também pela sua capacidade de suportar as demandas físicas das corridas (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018).

Ademais, a textura das superfícies do veículo é cuidadosamente refinada. O objetivo é encontrar o equilíbrio ideal entre os fluxos laminar e turbulento, que pode variar dependendo da parte específica do carro e das condições da corrida (MOREIRA, 2015; MENEZES *et al.*, 2019).

Tecnologias ativas, como asas móveis e sistemas de controle de fluxo de ar, são utilizadas para ajustar a aerodinâmica do veículo em tempo real. Esses sistemas permitem uma adaptação rápida às mudanças de velocidade e às condições variáveis da pista, otimizando o desempenho aerodinâmico em diferentes cenários de corrida (SAKAI, 2018).

A análise computacional de fluidos (CFD) e os testes em túneis de vento são ferramentas essenciais nesse processo. Eles permitem que os engenheiros visualizem e otimizem o fluxo de ar em torno do veículo, proporcionando perspectivas importantes que orientam o refinamento contínuo do design aerodinâmico. Essas ferramentas são cruciais para alcançar o menor arrasto possível, maximizando a eficiência e a performance do carro (MARQUES, 2017).

A gestão do arrasto aerodinâmico em carros de corrida é, portanto, um exercício complexo de equilíbrio entre vários fatores interdependentes. O sucesso nesse campo depende de um entendimento profundo da dinâmica do fluxo de ar e da habilidade de aplicar esse conhecimento de maneira prática e inovadora no design e na operação de carros de alta performance. À medida que a tecnologia continua a avançar, novas metodologias e materiais surgem, oferecendo aos engenheiros novas formas de enfrentar o desafio contínuo de reduzir o arrasto e aumentar a velocidade.

#### **2.2.6. COEFICIENTE DE ARRASTO E SUA IMPORTÂNCIA NO DESIGN AUTOMOTIVO.**

O coeficiente de arrasto ( $C_d$ ), uma métrica crucial no design automotivo, especialmente na engenharia de carros de corrida, representa a eficiência aerodinâmica de um veículo (Marques, 2017). Este coeficiente é um indicador chave de como o ar interage com a superfície do carro. A compreensão e

otimização do  $C_d$  são essenciais para projetar veículos que não apenas atinjam altas velocidades, mas também sejam eficientes em termos de consumo de combustível e estabilidade (BRAGA, 2011; COIMBRA, 2018).

O  $C_d$  é influenciado por vários fatores, incluindo a forma do veículo, a rugosidade da superfície e as características aerodinâmicas, como asas e difusores (BORSATTI, 2010). Um coeficiente de arrasto baixo indica que o veículo pode “cortar” o ar de maneira mais eficiente, reduzindo a resistência aerodinâmica e, portanto, exigindo menos energia para manter ou aumentar a velocidade (AZONI, 2022).

A otimização do  $C_d$  em carros de corrida envolve um equilíbrio entre reduzir a resistência ao ar e manter a *downforce* necessária para a aderência em altas velocidades. Este equilíbrio é crucial para o desempenho do veículo, afetando tanto a aceleração quanto a eficiência do combustível (MENEZES *et al.*, 2019).

Engenheiros utilizam ferramentas como análise computacional de fluidos (CFD) e testes em túneis de vento para medir e otimizar o  $C_d$  de carros de corrida. Essas técnicas permitem visualizar o fluxo de ar ao redor do veículo e fazer ajustes no design para alcançar a eficiência aerodinâmica ideal (SOARES, 2013; LIMA, 2018).

### 2.2.7. DEFINIÇÃO E CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ARRASTO

O coeficiente de arrasto ( $C_d$ ) é uma medida adimensional crucial no campo da aerodinâmica, especialmente no design automotivo. Ele descreve a resistência de um objeto ao movimento no ar e é calculado considerando a resistência aerodinâmica, a área frontal do veículo e a densidade do ar. Matematicamente, o  $C_d$  é definido pela fórmula:

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho v^2 A}$$

Nessa equação,  $F_d$  representa a força de arrasto,  $\rho$  a densidade do ar,  $v$  a velocidade do veículo e  $A$  a área frontal. Esta relação indica que o coeficiente

de arrasto é diretamente proporcional à força de arrasto exercida sobre o veículo e inversamente proporcional à área frontal do mesmo (BRAGA, 2011; COIMBRA, 2018).

O  $C_d$  é uma métrica essencial para engenheiros ao projetar veículos, especialmente carros de corrida, onde a eficiência aerodinâmica é fundamental para o desempenho. Uma compreensão profunda do  $C_d$  permite aos engenheiros fazer ajustes no design do veículo para otimizar a resistência aerodinâmica, equilibrando assim a necessidade de velocidade e eficiência (MARQUES, 2017; MENEZES *et al.*, 2019).

O impacto do coeficiente de arrasto na eficiência e na performance do veículo é significativo, influenciando desde o consumo de combustível até a estabilidade e a aceleração do veículo. Por isso, a otimização do  $C_d$  é um aspecto crucial no design de veículos de alta performance (SOARES, 2013; LIMA, 2018).

#### **2.2.8. IMPORTÂNCIA DO COEFICIENTE DE ARRASTO NO DESIGN AUTOMOTIVO**

A otimização do coeficiente de arrasto  $C_d$  em veículos é crucial, com implicações que vão além do design automotivo e abrangem aspectos fundamentais como eficiência de combustível, performance, estabilidade, manuseio e sustentabilidade ambiental (MENEZES *et al.*, 2019; MARQUES, 2017).

Um baixo  $C_d$  indica que o veículo enfrenta menos resistência ao movimento através do ar, o que leva a uma menor necessidade de energia para manter ou aumentar a velocidade, resultando diretamente em uma melhor eficiência de combustível. Em carros de corrida, onde cada fração de segundo é crucial, um coeficiente de arrasto otimizado pode ser decisivo entre ganhar ou perder. Um veículo aerodinamicamente eficiente pode atingir velocidades mais altas com o mesmo consumo de combustível ou manter velocidades ideais com menos consumo, uma vantagem crucial em competições (BRAGA, 2011; COIMBRA, 2018).

Quanto à estabilidade e ao manuseio, o arrasto aerodinâmico também desempenha um papel importante. Veículos com design aerodinâmico superior

têm redução no levantamento aerodinâmico, a tendência de se elevar do solo em altas velocidades, o que melhora a aderência dos pneus à pista e, conseqüentemente, o controle e a segurança, tanto em corridas quanto em veículos de uso diário (SAKAI, 2018).

Na questão da sustentabilidade e redução de emissões, um baixo  $C_d$  é fundamental para a eficiência de combustível e, por extensão, para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Veículos com menor arrasto aerodinâmico requerem menos combustível para realizar o mesmo trabalho, contribuindo para uma pegada de carbono reduzida, alinhando-se às normas regulatórias e aos objetivos globais de sustentabilidade (SOARES, 2013; LIMA, 2018).

### **2.2.9. FATORES QUE INFLUENCIAM O COEFICIENTE DE ARRASTO**

No design automotivo, a influência do design da carroceria no coeficiente de arrasto  $C_d$  é fundamental. Engenheiros automotivos reconhecem que a forma da carroceria não é apenas uma questão estética, mas um elemento crucial para a eficiência aerodinâmica (BIRRENTO, 2008; BRAGA, 2011). Linhas aerodinâmicas, superfícies suaves e contornos bem projetados são essenciais para reduzir o arrasto aerodinâmico. Esses elementos contribuem para um fluxo de ar mais eficiente ao redor do veículo, minimizando turbulências e resistências indesejadas.

A otimização do design envolve a criação de um perfil que minimize áreas de alta pressão na frente e maximize áreas de baixa pressão na traseira, reduzindo a diferença de pressão ao longo do veículo, que é um fator chave no desenvolvimento do arrasto. Esta eficiência no design não só melhora o  $C_d$ , mas também aumenta a performance geral do veículo, resultando em maior velocidade e menor consumo de combustível (COIMBRA, 2018; MENEZES *et al.*, 2019).

A aerodinâmica ativa, uma inovação significativa, especialmente em carros de corrida, inclui sistemas como asas ajustáveis e difusores ativos que alteram o perfil aerodinâmico do veículo em resposta a diferentes condições de condução. Em corridas, permitindo ajustar a *downforce* para otimizar a aderência

em curvas sem comprometer a velocidade nas retas (SAKAI, 2018; SOARES, 2013).

A implementação de aerodinâmica ativa em carros de corrida é um exemplo de como a engenharia automotiva avançou, refletindo uma compreensão mais profunda das forças aerodinâmicas e como elas podem ser manipuladas para atender às necessidades específicas de performance e eficiência. Essa tecnologia também tem potencial para aplicação em veículos de consumo, contribuindo para a melhoria da eficiência de combustível e a redução de emissões, ajustando-se automaticamente para proporcionar o melhor equilíbrio entre *downforce* e arrasto em diferentes velocidades e condições de condução (LIMA, 2018; MARQUES, 2017).

#### **2.2.10. ESCOLHA DE MATERIAIS**

Na indústria automobilística, especialmente no segmento de carros de corrida, a escolha de materiais é crucial, impactando significativamente a performance, segurança e eficiência aerodinâmica dos veículos (BORSATTI, 2010; BRAGA, 2011). Materiais leves e rígidos, como a fibra de carbono, são amplamente utilizados devido à sua capacidade de criar formas aerodinâmicas precisas e contribuir para a redução do peso geral do veículo, melhorando assim o coeficiente de arrasto  $C_d$  (COIMBRA, 2018; MARQUES, 2017).

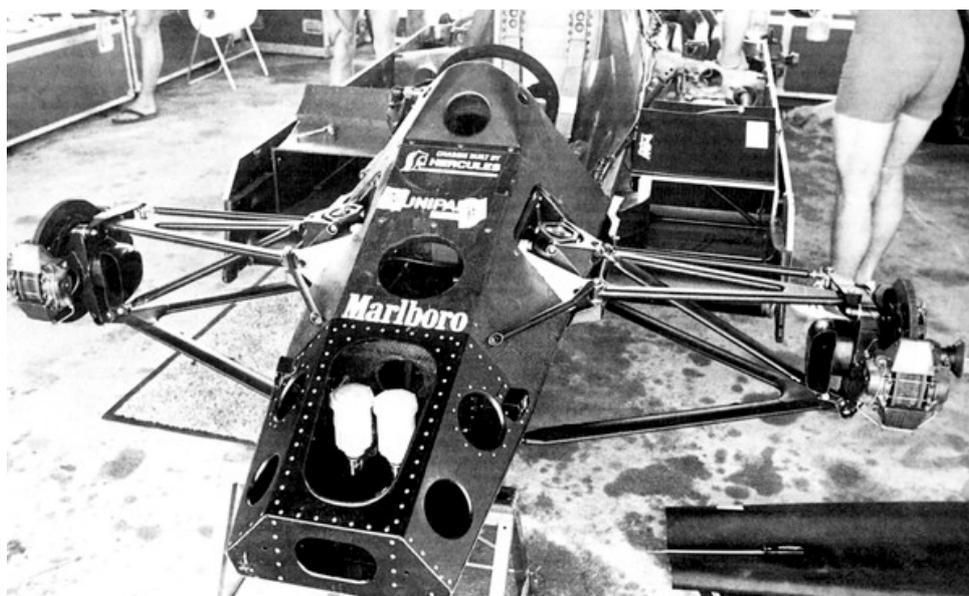
A importância da leveza dos materiais na engenharia automotiva é vital, especialmente em carros de corrida, onde cada fração de segundo é crítica. Materiais mais leves aumentam a eficiência do combustível e melhoram a dinâmica geral do veículo. Com menor peso, a energia necessária para acelerar e mover o veículo é reduzida, resultando em menor consumo de combustível e maior agilidade (SOARES, 2013; LIMA, 2018).

Paralelamente, a rigidez dos materiais é crucial para manter a integridade estrutural do veículo. Materiais rígidos asseguram que as forças aerodinâmicas sejam eficientemente transferidas por toda a estrutura, essencial para melhorar a aderência e estabilidade em altas velocidades (MENEZES *et al.*, 2019; SAKAI, 2018).

A fibra de carbono, um material revolucionário na engenharia de carros de corrida, oferece uma combinação notável de leveza e rigidez, permitindo aos

engenheiros projetar carros mais leves com distribuição de peso eficiente, crucial para a performance em alta velocidade. A capacidade de moldar a fibra de carbono em formas complexas e precisas é fundamental para otimizar a aerodinâmica do veículo (MOREIRA, 2015; PEREIRA, 2005).

**Figura 12** - McLaren MP4/1 em 1981, primeiro chassis inteiramente feito em fibra de carbono.



SABINO, Fred. Máquinas Eternas #35: McLaren MP4/1 foi primeiro carro feito em fibra de carbono Site: Globo Esporte. 2021.

A redução do peso geral do veículo, por meio do uso de materiais leves como a fibra de carbono, afeta diretamente o  $C_d$ . Carros mais leves são mais ágeis e necessitam de menos força para superar a resistência do ar, alcançando velocidades elevadas mais rapidamente, um fator crucial nas corridas. Além do desempenho na pista, esta eficiência tem implicações significativas para a eficiência de combustível e sustentabilidade, alinhando a indústria automotiva com práticas mais sustentáveis (AZONI, 2022; FONTANELLA *et al.*, 2019).

### 2.2.11. DESAFIOS E CONSIDERAÇÕES

Apesar dos benefícios inegáveis dos materiais avançados como a fibra de carbono, existem desafios associados ao seu uso na indústria automobilística. O custo de produção desses materiais é frequentemente significativamente mais

alto do que os materiais tradicionais, o que pode limitar sua acessibilidade fora do segmento de alto desempenho (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018). Além disso, a fabricação e o reparo desses materiais requerem conhecimentos especializados e equipamentos específicos, o que pode restringir sua aplicação em certos contextos (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

A fibra de carbono, apesar de suas vantagens em termos de leveza e rigidez, apresenta desafios em termos de custo e complexidade de fabricação. Esses fatores podem tornar o uso dessa tecnologia proibitivo em segmentos de mercado mais acessíveis ou em aplicações onde os custos de produção precisam ser mantidos mais baixos (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013). Além disso, a necessidade de conhecimento técnico especializado e equipamentos avançados para a fabricação e reparo desses materiais pode ser um obstáculo para sua utilização em larga escala na indústria automotiva (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

### **2.2.12. SUSTENTABILIDADE E INOVAÇÕES FUTURAS**

A sustentabilidade é uma consideração crescente na escolha de materiais para carros de corrida, especialmente no contexto da produção e do descarte de materiais como a fibra de carbono. A fibra de carbono, enquanto oferece benefícios significativos de performance, requer uma avaliação cuidadosa de seu ciclo de vida completo, que inclui produção, uso e descarte (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018). A indústria automotiva está explorando maneiras de tornar a produção desses materiais mais sustentável e de reciclar componentes ao final de sua vida útil, visando minimizar o impacto ambiental (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

Ademais, a pesquisa contínua em materiais compósitos e nanotecnologia está abrindo caminho para o desenvolvimento de novos materiais. Esses materiais prometem oferecer as mesmas ou melhores propriedades que a fibra de carbono, mas com um impacto ambiental e custo reduzidos (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013). A evolução desses novos materiais pode representar um avanço significativo na engenharia automotiva, permitindo a produção de veículos que não só atendem aos altos padrões de desempenho, mas também

contribuem para a sustentabilidade e a redução da pegada ecológica (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

### **2.2.13. DESAFIOS E INOVAÇÕES NA OTIMIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE ARRASTO**

A otimização do coeficiente de arrasto  $C_d$  em veículos é um aspecto central na engenharia automotiva, apresentando desafios e exigindo inovações constantes. Cada veículo, com suas peculiaridades e necessidades, demanda um equilíbrio cuidadoso entre diversos fatores para alcançar um  $C_d$  ideal (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018). Este equilíbrio requer habilidade técnica, criatividade e a aplicação de tecnologias avançadas, além de uma visão inovadora. A necessidade de melhorar a eficiência do combustível, aumentar a performance e, nos últimos anos, aprimorar a autonomia de veículos elétricos e híbridos, torna a otimização do  $C_d$  um aspecto crucial do design automotivo (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

Encontrar o equilíbrio certo no aprimoramento do  $C_d$  envolve conciliar a eficiência aerodinâmica com outros requisitos de design e performance. Reduzir a área frontal do veículo pode diminuir o arrasto, mas também limitar aspectos como espaço interno e capacidade do motor. A adição de componentes aerodinâmicos para diminuir o arrasto pode resultar em um aumento do peso do veículo, afetando a eficiência do combustível e a dinâmica de condução (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013).

O custo e a complexidade associados ao desenvolvimento de designs aerodinâmicos são desafiantes. Processos como simulações computacionais avançadas e testes em túneis de vento são fundamentais, mas exigem investimentos significativos de tempo e recursos. A precisão dessas simulações é crucial, pois imprecisões podem levar a designs ineficazes ou até contraproducentes (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

A indústria automotiva tem feito avanços significativos em simulações computacionais e testes em túneis de vento. O uso da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) permite que engenheiros modelem e visualizem o fluxo de ar ao redor de protótipos virtuais, aperfeiçoando o design antes da construção física. Os túneis de vento evoluíram para simular uma gama mais ampla de

condições de condução e fornecer dados mais precisos sobre o comportamento aerodinâmico dos veículos. A combinação de testes em túneis de vento com simulações de CFD forma uma abordagem robusta para otimizar o  $C_d$  dos veículos (AZONI, 2022; FONTANELLA *et al.*, 2019).

Com o aumento da popularidade dos veículos elétricos e híbridos, a otimização do  $C_d$  tornou-se ainda mais crucial. Estes veículos dependem de sua eficiência aerodinâmica para maximizar a autonomia. Um baixo  $C_d$  reduz a quantidade de energia necessária para superar o arrasto aerodinâmico, permitindo que o veículo percorra distâncias maiores com uma única carga (BRAGA, 2011; MENEZES *et al.*, 2019).

A pesquisa e desenvolvimento de novos materiais também são fundamentais para otimizar o  $C_d$ . Materiais leves e rígidos, como a fibra de carbono, permitem a criação de formas aerodinâmicas mais precisas e reduzem o peso total do veículo, contribuindo para uma aerodinâmica melhorada. Além disso, o advento de materiais inteligentes e adaptáveis pode abrir novos caminhos para designs que alteram suas características aerodinâmicas em resposta a diferentes condições de condução (COIMBRA, 2018; LIMA, 2018).

A sustentabilidade é uma consideração crescente no design automotivo. A otimização do  $C_d$  não apenas melhora a eficiência do combustível e a autonomia dos veículos elétricos e híbridos, mas também contribui para a redução das emissões de carbono. À medida que as regulamentações ambientais se tornam mais rigorosas, espera-se que a indústria automotiva continue a inovar em designs aerodinâmicos que sejam ecologicamente corretos e eficientes (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

### **2.3. Downforce**

O conceito de *downforce* é essencial na engenharia, especialmente no design de carros de corrida. *Downforce*, ou força descendente, é a pressão aerodinâmica direcionada para baixo exercida sobre um veículo em movimento, fundamental para a aderência do veículo à pista e influenciando sua estabilidade e manobrabilidade em altas velocidades (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018).

A *downforce* é gerada por componentes aerodinâmicos como asas, spoilers e difusores, que moldam o fluxo de ar para aumentar a pressão

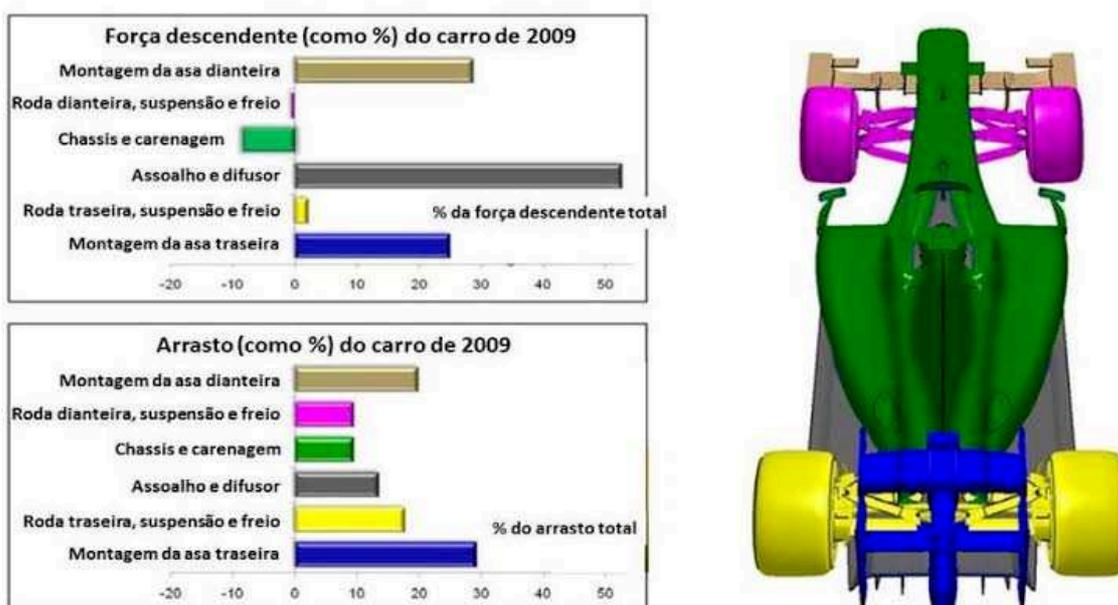
aerodinâmica para baixo. Este princípio é análogo à sustentação em aeronaves, mas em direção oposta, com componentes aerodinâmicos de carros de corrida orientados para pressionar o veículo contra a pista (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

As asas dianteiras e traseiras de um carro de corrida exemplificam a geração de *downforce*. Elas são anguladas para que o ar se mova mais rápido sobre elas do que por baixo, criando uma força descendente segundo o Princípio de Bernoulli. Difusores na parte traseira do veículo também contribuem para a *downforce* ao acelerar o fluxo de ar sob o carro (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013).

A *downforce* melhora significativamente a aderência, permitindo que o carro faça curvas mais rapidamente e com maior controle, reduzindo as chances de derrapagem. Também melhora a eficiência dos freios, permitindo frenagens mais rápidas e eficientes, essenciais em corridas (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

Contudo, a *downforce* pode aumentar o arrasto aerodinâmico, reduzindo a velocidade máxima do veículo. Por isso, é crucial encontrar um equilíbrio ideal entre *downforce* e arrasto para otimizar a velocidade e a manobrabilidade do veículo (AZONI, 2022; FONTANELLA *et al.*, 2019).

**Figura 13** - Ação aerodinâmica em várias partes de um veículo de alta performance.



A eficiência aerodinâmica, representada pela relação sustentação/arrasto, é maximizada na região do assoalho e difusor de um veículo, como apresentado na figura 13. Essa parte específica opera ao acelerar o ar na região inferior central, gerando uma pressão manométrica negativa. Isso ocorre quando a pressão medida é inferior à pressão atmosférica local, comum em situações como vácuo. Para otimizar sua eficácia, é crucial que o fluxo de ar entre sob o veículo e percorra todo o assoalho e difusor, evitando dispersões laterais (DUARTE, 2015).

Ademais, analisando-se a figura 13, a montagem da asa traseira em um veículo de corrida desempenha um papel fundamental na gestão das forças aerodinâmicas. Ao ser projetada cuidadosamente, a asa traseira minimiza a resistência do ar, reduzindo o arrasto e contribuindo para a eficiência aerodinâmica do veículo, o que é crucial para alcançar velocidades mais altas. Simultaneamente, a asa traseira é configurada para gerar *downforce*, aplicando uma força descendente que pressiona o veículo contra o solo. Essa força descendente aumenta a aderência dos pneus, melhorando a estabilidade e o controle do veículo, especialmente em curvas de alta velocidade. Portanto, a montagem estratégica da asa traseira busca um equilíbrio preciso entre a minimização do arrasto e a geração eficaz de *downforce* para otimizar o desempenho global do veículo durante competições automobilísticas (DUARTE, 2015)

### **2.3.1. EXPLICAÇÃO DE COMO A *DOWNFORCE* É GERADA E SEU EFEITO SOBRE A ADERÊNCIA DO VEÍCULO.**

A *downforce*, uma força aerodinâmica crucial na engenharia automotiva, é fundamental para o desempenho de veículos de alta velocidade, especialmente em carros de corrida. Esta força descendente é gerada pela interação do veículo com o ar ao seu redor, e sua gestão técnica influencia diretamente a aderência do veículo à pista. Compreender a geração e o impacto da *downforce* é essencial para o design de veículos que buscam otimizar segurança e desempenho (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018).

A *downforce* é produzida principalmente por elementos aerodinâmicos como asas, spoilers e difusores. Estes componentes manipulam o fluxo de ar ao redor do veículo para aumentar a pressão sobre sua superfície, empurrando-o para baixo contra a pista. Asas e spoilers são posicionados para criar uma diferença de pressão entre suas partes superior e inferior, gerando força descendente. Difusores na parte traseira do veículo aceleram o fluxo de ar sob o carro, criando uma área de baixa pressão e contribuindo para a *downforce* (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

A *downforce* melhora significativamente a aderência do veículo, essencial para estabilidade e manobrabilidade em altas velocidades e curvas fechadas. Com maior *downforce*, os pneus são pressionados firmemente contra a pista, aumentando a fricção e, por conseguinte, a aderência, permitindo curvas mais rápidas e controladas, reduzindo o risco de derrapagem ou perda de tração (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013).

Além de melhorar a estabilidade, a *downforce* aumenta a eficácia dos sistemas de frenagem, permitindo paradas mais rápidas e seguras, crucial em competições automobilísticas. Contudo, a geração de *downforce* pode aumentar o arrasto aerodinâmico, potencialmente reduzindo a velocidade máxima do veículo. Engenheiros de automobilismo devem, portanto, encontrar um equilíbrio entre *downforce* necessária para aderência e arrasto mínimo para manter a velocidade (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

### **2.3.2. ANÁLISE DO PAPEL DOS COMPONENTES AERODINÂMICOS COMO ASAS, SPOILERS E DIFUSORES NA GERAÇÃO DE *DOWNFORCE*.**

Na engenharia automotiva, especialmente no design de carros de corrida, os componentes aerodinâmicos como asas, spoilers e difusores são fundamentais na geração de *downforce*, uma força aerodinâmica que aumenta a aderência dos pneus à pista. Compreender o papel desses componentes é crucial para otimizar o desempenho do veículo, particularmente em altas velocidades e condições de corrida desafiadoras (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018).

As asas, situadas geralmente na traseira, como mostra a figura 14 (e às vezes na dianteira, como apresentado na figura 15) do veículo, são projetadas

para manipular o fluxo de ar e criar *downforce*. Inspiradas nas asas de aviões, mas com objetivos opostos, as asas de carros de corrida são anguladas para criar uma pressão mais baixa acima e uma pressão mais alta abaixo, gerando *downforce*. A eficiência das asas em gerar *downforce* é influenciada por seu design, incluindo ângulo de ataque, curvatura e área da superfície (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

**Figura 14** - Asa traseira da Mercedes-AMG F1 W12, em 2021.



Autor Desconhecido. **Asa traseira da Mercedes passa por novo teste da FIA.** Site: Auto Racing. 2021.

**Figura 15** - Asa dianteira da Mercedes-AMG F1 W12, em 2021.



Autor Desconhecido. **F1 – Avaliação técnica do Mercedes W12.** Site: Auto Racing. 2021.

Os spoilers - apresentado na figura 16 - localizados na parte traseira do veículo, são projetados para 'estragar' o fluxo de ar turbulento, reduzindo o levantamento aerodinâmico e aumentando a estabilidade. Eles interferem no fluxo de ar, aumentando a pressão sobre a carroceria e melhorando a aderência dos pneus à pista. Embora não gerem tanta *downforce* quanto as asas, os spoilers são eficazes em equilibrar o veículo, especialmente durante a frenagem e em altas velocidades (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013).

**Figura 16** - Spoiler colocado em um carro da competição Nascar.



BARBOSA, Lucas Melo Queiroz. Influência Aerodinâmica em um Carro de Fórmula SAE. Universidade federal de Uberlândia. 2018.

Difusores (figura 17), situados na parte inferior traseira do veículo, manipulam o fluxo de ar sob o carro para aumentar sua velocidade, reduzindo a pressão do ar e criando *downforce*. Eles também ajudam a reduzir a turbulência e o arrasto, melhorando a eficiência aerodinâmica (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

Figura 17 - Difusor do carro Red Bull Racing RB18, em 2022.



NUGNES, Franco; PIOLA, Giorgio. Site: Motorsport. 2022.

O equilíbrio correto entre asas, spoilers e difusores é vital para garantir a estabilidade do veículo em diversas condições de corrida. *Downforce* excessiva pode aumentar o arrasto aerodinâmico, enquanto *downforce* insuficiente pode comprometer a aderência. Engenheiros devem encontrar um equilíbrio ideal, frequentemente ajustando os componentes com base em testes extensivos e simulações computacionais (AZONI, 2022; FONTANELLA *et al.*, 2019).

### 2.3.3. RELAÇÃO ENTRE *DOWNFORCE*, PRESSÃO AERODINÂMICA E A PERFORMANCE DO VEÍCULO EM CURVAS E RETAS.

A relação entre *downforce*, pressão aerodinâmica e performance de veículos, especialmente em corridas automobilísticas de alta velocidade, é uma área fundamental na engenharia automotiva. Esses fatores estão intimamente interligados e são cruciais para determinar a eficiência com que um veículo pode manobrar em curvas e acelerar em retas (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018).

*Downforce*, gerada por elementos aerodinâmicos como asas, spoilers e difusores, aumenta a aderência dos pneus à pista, melhorando a estabilidade e a capacidade de manobra do veículo. A pressão aerodinâmica, que é a força exercida pelo ar sobre o veículo, quando otimizada, resulta em maior *downforce*,

crucial para melhorar a aderência e estabilidade, especialmente em altas velocidades e manobras complexas (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

Em curvas, a *downforce* ajuda a manter a tração, permitindo que o carro faça curvas mais rapidamente e com maior controle, minimizando o tempo de volta em corridas. Por outro lado, em retas, é importante balancear *downforce* e arrasto aerodinâmico. Excesso de *downforce* pode aumentar o arrasto, reduzindo a velocidade máxima do veículo (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013).

Otimizar essa relação envolve desafios como ajustar constantemente os componentes aerodinâmicos para diferentes pistas e condições, e a busca por materiais leves e rígidos que suportem as forças geradas pela *downforce* sem adicionar peso desnecessário. Tecnologias aerodinâmicas ativas, como asas ajustáveis, permitem ajustes em tempo real para maximizar a *downforce* em curvas e minimizar o arrasto em retas (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

## 2.4. Equilíbrio Aerodinâmico

O equilíbrio aerodinâmico em veículos, particularmente em carros de corrida, é um aspecto crítico da engenharia automotiva que envolve um entendimento profundo da aerodinâmica para otimizar a performance. Este equilíbrio entre *downforce* e arrasto é vital para adaptar o veículo às condições específicas de cada pista, considerando fatores como velocidade e aderência (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018).

*Downforce*, gerada por componentes aerodinâmicos, aumenta a aderência dos pneus à pista, melhorando a estabilidade e permitindo curvas mais rápidas. Contudo, o aumento da *downforce* geralmente acarreta um aumento no arrasto aerodinâmico, que pode reduzir a velocidade máxima e aumentar o consumo de combustível. Engenheiros buscam um equilíbrio ideal entre *downforce* e arrasto, ajustando o design aerodinâmico do veículo para oferecer o melhor compromisso entre esses aspectos (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

A configuração aerodinâmica varia conforme o tipo de pista. Em pistas com longas retas, uma configuração com menor *downforce* e arrasto é preferível para atingir velocidades mais altas. Em contraste, em pistas com muitas curvas

fechadas, uma configuração de alta *downforce* é essencial para melhor manobrabilidade em curvas, mesmo que isso resulte em maior arrasto e velocidade máxima reduzida (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013).

A otimização do equilíbrio aerodinâmico envolve considerar variáveis como condições meteorológicas, desgaste dos pneus e estratégia de corrida. A aerodinâmica ativa, com ajustes em tempo real dos componentes aerodinâmicos, é uma inovação promissora, permitindo adaptação dinâmica às condições variáveis. Também, o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias aerodinâmicas facilita a construção de componentes mais eficientes e simulações computacionais avançadas para entender melhor as complexidades aerodinâmicas (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

## 2.5. Simulação e Modelagem

Na engenharia automotiva, a simulação e a modelagem são essenciais para aprimorar a aerodinâmica de veículos, desde carros de passeio até carros de corrida de alto desempenho. Estas técnicas avançadas, que incluem métodos computacionais e testes em túneis de vento, permitem prever e otimizar o desempenho aerodinâmico antes da construção física dos veículos (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018).

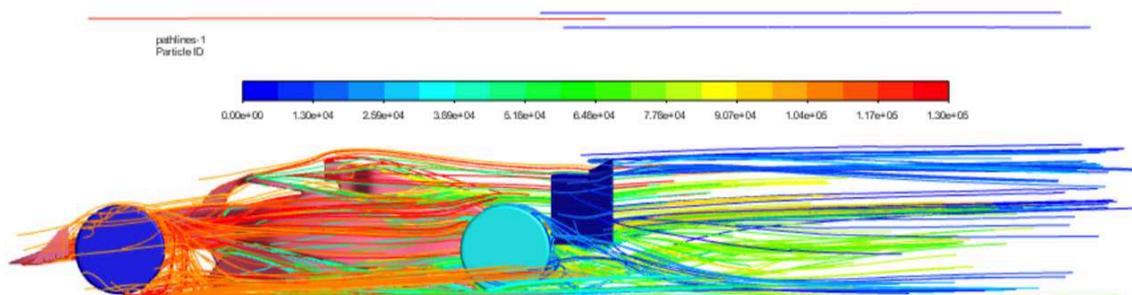
A Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) revolucionou a abordagem dos engenheiros para a aerodinâmica automotiva, permitindo simulações detalhadas do fluxo de ar ao redor de modelos virtuais de veículos. Essas simulações identificam áreas de alta e baixa pressão, turbulência e potenciais pontos de separação do fluxo de ar. Com o avanço tecnológico, as simulações de CFD tornaram-se mais precisas, modelando cenários complexos e permitindo ajustes no design antes da construção física, economizando recursos (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

Os túneis de vento complementam as simulações computacionais, fornecendo validação empírica e permitindo observar o comportamento do fluxo de ar ao redor do veículo em condições controladas. Nos túneis de vento, os engenheiros podem medir o arrasto, a *downforce* e outras forças aerodinâmicas, testando diferentes configurações de componentes aerodinâmicos para determinar as mais eficientes (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013).

A combinação de CFD e testes em túneis de vento representa a abordagem mais eficaz para a pesquisa e desenvolvimento aerodinâmico, permitindo uma iteração rápida entre design e teste, onde os resultados dos testes podem informar simulações subsequentes e vice-versa, aumentando a precisão e acelerando o processo de desenvolvimento (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

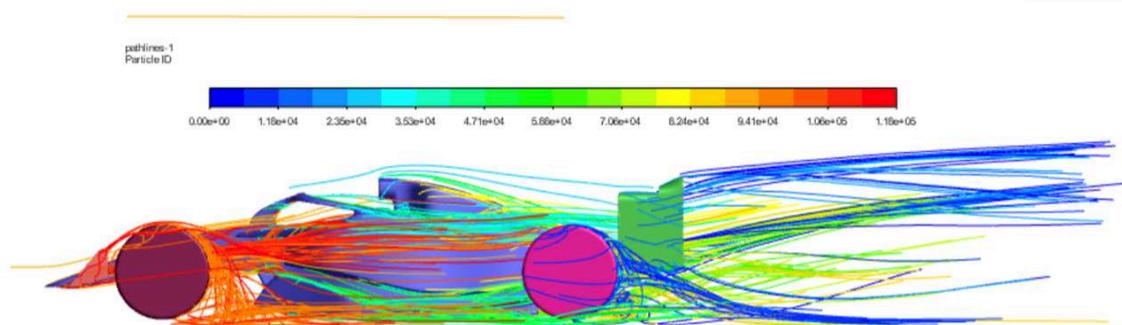
A título de exemplo, a aplicação de CFD no desenvolvimento do DRS (*Drag Reduction System*), sistema que permite aos pilotos abrir uma aba móvel na asa traseira para reduzir o arrasto aerodinâmico e facilitar ultrapassagens em condições específicas, envolve simulações computacionais avançadas para analisar o fluxo de ar ao redor do veículo. Como mostram as figuras 18 e 19, isso inclui investigar como a abertura do DRS afeta as forças aerodinâmicas, equilibrando a busca por velocidade máxima com a necessidade de manter a estabilidade do carro. Esses estudos, baseados em modelagem matemática e simulações numéricas, desempenham um papel vital na busca por soluções aerodinâmicas eficazes, contribuindo para o constante aprimoramento da performance dos carros de Fórmula 1 (MELO, 2023).

**Figura 18** - Linhas de Fluxo com o DRS acionado.



MELO, Patrick Ericson da Silva. **Influência da Asa Traseira no Escorregamento em Veículos de Fórmula 1**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2023.

**Figura 19** - Linhas de Fluxo com o DRS desativado.



MELO, Patrick Ericson da Silva. **Influência da Asa Traseira no Escorregamento em Veículos de Fórmula 1**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2023.

Apesar dos avanços, essas tecnologias enfrentam desafios como a precisão dos modelos matemáticos e computacionais em CFD e as limitações dos túneis de vento. O futuro promete inovações contínuas, com modelos de CFD mais precisos, túneis de vento avançados e a integração de novas tecnologias, como realidade aumentada e aprendizado de máquina, para uma compreensão mais profunda da aerodinâmica automotiva.

## 2.6. Influência da Aerodinâmica na Eficiência do Veículo

A aerodinâmica é uma área crucial na engenharia automotiva, desempenhando um papel significativo na eficiência dos veículos e impactando diretamente o consumo de combustível e a sustentabilidade ambiental. Essa disciplina, que analisa as forças do ar e sua interação com veículos em movimento, é essencial para otimizar o desempenho de uma ampla gama de veículos, desde carros de passageiros até veículos de alto desempenho e carros de corrida (BORSATTI, 2010; COIMBRA, 2018).

No contexto de veículos de passageiros e carros de corrida, a aerodinâmica influencia vários aspectos do desempenho, incluindo a eficiência do combustível, a estabilidade, a aderência à pista e a velocidade máxima. A eficiência aerodinâmica é medida principalmente pelo coeficiente de arrasto ( $C_d$ ), que quantifica a resistência aerodinâmica de um veículo. Um  $C_d$  baixo indica que o veículo pode se mover mais facilmente através do ar, o que leva a

um menor consumo de combustível e a emissões reduzidas, tornando o veículo mais sustentável e ecologicamente correto (MARQUES, 2017; SAKAI, 2018).

Para carros de corrida, a aerodinâmica é ainda mais crítica. Além de buscar a eficiência do combustível, esses veículos precisam otimizar a *downforce* para aumentar a aderência dos pneus à pista, permitindo curvas mais rápidas e uma melhor performance geral. Contudo, o aumento da *downforce* muitas vezes vem acompanhado de um aumento no arrasto aerodinâmico, o que pode reduzir a velocidade máxima do veículo. Portanto, o desafio para os engenheiros é encontrar o equilíbrio ideal entre *downforce* e arrasto para cada tipo de pista e condição de corrida (MENEZES *et al.*, 2019; SOARES, 2013).

A aerodinâmica também tem um papel fundamental na segurança dos veículos. Um design aerodinâmico eficiente pode reduzir o levantamento aerodinâmico e aumentar a estabilidade do veículo em altas velocidades, melhorando assim a segurança do condutor e dos passageiros. Além disso, a aerodinâmica é usada para otimizar o resfriamento de componentes vitais do veículo, como o motor e os freios, através da gestão eficaz do fluxo de ar (LIMA, 2018; PEREIRA, 2005).

Com os avanços na tecnologia e na pesquisa, a aerodinâmica automotiva continua a evoluir, trazendo novas inovações e melhorias na eficiência e na performance dos veículos. A pesquisa contínua em materiais leves, design aerodinâmico e tecnologias avançadas, como a simulação computacional e os testes em túneis de vento, permitem aos engenheiros explorar soluções inovadoras para os desafios aerodinâmicos atuais e futuros.

## **2.7. Impacto do Arrasto Aerodinâmico no Consumo de Combustível**

O arrasto aerodinâmico, um componente chave da aerodinâmica, exerce um impacto significativo na eficiência dos veículos. Este arrasto, que é a resistência do ar ao movimento do veículo, influencia diretamente o consumo de combustível. Veículos com alto arrasto exigem mais energia para se mover, resultando em maior consumo de combustível, uma relação evidenciada em estudos como os de Windlin *et al.* (2012) e Sakai (2018).

Diversos fatores influenciam o arrasto aerodinâmico, como a forma do veículo, a área de superfície exposta ao fluxo de ar e a rugosidade da superfície.

Veículos com designs aerodinâmicos, que apresentam superfícies lisas e contornos eficientes, tendem a ter menor arrasto, enquanto designs menos aerodinâmicos resultam em maior arrasto e consumo de combustível (MARQUES, 2017; COIMBRA, 2018).

Além de afetar o consumo de combustível, a aerodinâmica é vital para a sustentabilidade e economia de energia. A eficiência energética dos veículos tornou-se uma prioridade global, e melhorar a aerodinâmica é uma forma eficaz de aumentar essa eficiência, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa (BORSATTI, 2010; LIMA, 2018).

Nos veículos elétricos, a aerodinâmica é ainda mais crucial, pois está diretamente relacionada à autonomia do veículo. Um menor arrasto aerodinâmico aumenta a distância percorrida por carga, tornando os veículos elétricos mais atraentes e viáveis (SOARES, 2013; PEREIRA, 2005).

Para otimizar a aerodinâmica, os engenheiros utilizam estratégias como o design de carrocerias aerodinâmicas, a redução da área frontal, o uso de materiais leves e a implementação de componentes aerodinâmicos ajustáveis. Ademais, a indústria automotiva está investindo em P&D para criar designs e tecnologias que melhorem a eficiência aerodinâmica, incluindo simulações computacionais avançadas e testes em túneis de vento (MENEZES *et al.*, 2019; NOLLI *et al.*, 2022).

Apesar dos avanços, desafios permanecem, como equilibrar a eficiência aerodinâmica com estética, funcionalidade e custo. A eletrificação traz novos desafios, como integrar baterias e componentes elétricos sem comprometer a eficiência aerodinâmica (RECH, 2023; OLIVEIRA, 2020).

A aerodinâmica continuará a ser um campo vital na engenharia automotiva, impulsionando o desenvolvimento de soluções inovadoras para veículos mais eficientes e sustentáveis (VENANCIO, 2021; MOCROSKY, 2007).

## **2.8. Desenvolvimento Histórico do Estudo Aerodinâmico**

A história do estudo aerodinâmico no automobilismo, evidenciada por estudos como os de Marra (2018) e Lima (2018), é marcada por uma evolução constante, refletindo a busca incessante por melhorias no desempenho dos veículos. Desde os primeiros anos do automobilismo, onde a aerodinâmica era

praticamente desconhecida, até os avanços contemporâneos, cada etapa trouxe inovações significativas que moldaram o esporte e a indústria.

Nos primórdios do automobilismo, os carros de corrida eram versões modificadas de veículos de rua, sem foco em aerodinâmica. A necessidade de entender o arrasto aerodinâmico surgiu com o aumento da competitividade e da velocidade nas corridas, levando a experimentações com carrocerias mais aerodinâmicas para aumentar as velocidades máximas (SOARES, 2013; PEREIRA, 2005).

A década de 1960 e 1970 foi um período de avanços significativos, marcado pela introdução de asas e aletas aerodinâmicas na Fórmula 1 e outras categorias, como a corrida de Le Mans (Figura 20), focando no aumento do *downforce* para melhorar a aderência. Essa era estabeleceu a aerodinâmica como um fator estratégico no design de veículos de corrida (NOLLI *et al.*, 2022; MENEZES *et al.*, 2019).

**Figura 20** – Ford GT40 e Ferrari 330 P4 no grid de largada, em 1960.



PIZZARDI, Francesco. Ferrari 250 LM - L'ultima Rossa vincitrice a Le Mans. Storie Automobilistiche. 2018.

O "efeito solo" (Figura 21) na Fórmula 1, introduzido no final dos anos 1970, foi uma inovação revolucionária. Carros com fundos aerodinâmicos que criavam um vácuo sob o veículo aumentaram o *downforce* sem elevar o arrasto, embora mais tarde tenham sido regulamentados por questões de segurança. O princípio do efeito solo consiste em direcionar o fluxo de ar de uma área mais ampla e fechada para uma mais estreita, permitindo que o ar seja contido

debaixo do carro. Para ativar o efeito solo, os veículos necessitam de saias laterais que confinem o ar sob o carro, proporcionando uma saída restrita determinada pelos projetistas (BORSATTI, 2010; MARQUES, 2017).

**Figura 21** - Lótus 79 na Fórmula 1, em 1978.



PIOLA, Giorgio. Análise técnica: Lotus 79 - como um erro ajudou a criar um ícone da F1. Site: Motor Sport. 2023.

As tecnologias aerodinâmicas ativas, como asas ajustáveis, surgiram como uma evolução importante, oferecendo ajustes em resposta às condições de corrida, destacando-se em carros como o McLaren F1 GTR dos anos 1990 (SAKAI, 2018; VENANCIO, 2021).

A evolução da aerodinâmica automotiva continuou com o uso de simulações computacionais avançadas e testes em túneis de vento, permitindo designs mais inovadores e um entendimento mais aprofundado da aerodinâmica (OLIVEIRA, 2020; RECH, 2023).

Mais recentemente, a aerodinâmica passou a se concentrar também na eficiência energética, especialmente no desenvolvimento de veículos elétricos e híbridos, onde a redução do arrasto é crucial para maximizar a autonomia (MOCROSKY, 2007; COIMBRA, 2018).

Esta trajetória da aerodinâmica no automobilismo destaca a natureza dinâmica e inovadora da engenharia automotiva, sempre em busca de novas soluções para melhorar o desempenho e eficiência dos veículos.

## **2.9. Métodos de Análise e Testes**

A metodologia de pesquisa em engenharia e física, destacada em estudos como os de Mocrosky (2007) e Sakai (2018), é fundamental para validar teorias e modelos. Esta metodologia abrange análise detalhada, testes práticos, modelagem computacional, simulações e o uso de túneis de vento, cada um contribuindo significativamente para o desenvolvimento de soluções inovadoras e para um entendimento profundo dos fenômenos em estudo.

Análises detalhadas e testes práticos são vitais para verificar a validade de modelos teóricos e soluções de engenharia, como demonstrado por Oliveira (2020) e Rech (2023). Esses métodos incluem experimentos em condições controladas, essenciais para a observação direta de sistemas ou materiais. Na engenharia automotiva, por exemplo, testes práticos avaliam protótipos de veículos em termos de velocidade, torque, eficiência do combustível e aerodinâmica.

A modelagem computacional e as simulações, enfatizadas por Venancio (2021) e Lima (2018), são ferramentas chave na pesquisa moderna, permitindo visualizar, testar e otimizar designs e teorias virtualmente. Especialmente na aerodinâmica, simulações computacionais como a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) são utilizadas para analisar interações do ar com veículos, crucial para o desenvolvimento de veículos eficientes e seguros.

Os túneis de vento são outra ferramenta essencial, como evidenciado por Pereira (2005) e Soares (2013). Eles fornecem meios para testar fisicamente modelos e teorias aerodinâmicas. Modelos em escala ou veículos reais são expostos a fluxos de ar controlados, permitindo observações diretas do comportamento aerodinâmico e a coleta de dados importantes. Essas metodologias, que variam em complexidade e aplicação, são indispensáveis não apenas na indústria automotiva, mas também em setores como aviação e construção civil, onde a aerodinâmica é crucial.

## 2.10. Desenvolvimento de Componentes Aerodinâmicos

No campo da engenharia automotiva, particularmente em carros de corrida, o desenvolvimento de componentes aerodinâmicos é uma área dinâmica e inovadora, crucial para o desempenho dos veículos. Estudos como os de Marques (2017) e Martins (2018) destacam a importância desses componentes, como spoilers, asas dianteiras e traseiras, e difusores, no design automotivo. Esses elementos são meticulosamente projetados para manipular o fluxo de ar, otimizando a eficiência, estabilidade e velocidade do veículo.

Spoilers, por exemplo, são desenvolvidos para interromper o fluxo de ar turbulento e reduzir o levantamento aerodinâmico, melhorando a estabilidade em altas velocidades, um aspecto crucial em carros de corrida, como discutido por Oliveira (2020) e Rech (2023). As asas dianteiras e traseiras, conforme explorado por Lisboa (2021) e Menezes *et al.* (2019), são fundamentais para regular o fluxo de ar e otimizar a distribuição da pressão, influenciando diretamente o equilíbrio aerodinâmico do veículo. A asa traseira, em particular, é essencial na geração de *downforce*, aumentando a tração e permitindo curvas mais ágeis.

Difusores, situados na parte inferior traseira, também são vitais para a eficiência aerodinâmica, aumentando a *downforce* sem adicionar arrasto significativo. Este desenvolvimento requer um entendimento aprofundado da dinâmica dos fluidos, destacando a sofisticação do design aerodinâmico moderno, como enfatizado por Sakai (2018) e Soares (2013).

Estudos de caso em carros de corrida, particularmente na Fórmula 1, Le Mans, e categorias de turismo e rally, ilustram a aplicação prática desses componentes aerodinâmicos. Na Fórmula 1, a inovação aerodinâmica é constante, com sistemas como o DRS (Sistema de Redução de Arrasto) permitindo ajustes na asa traseira para aumentar a velocidade e facilitar ultrapassagens, uma mudança revolucionária nas estratégias de corrida, como discutido por Venancio (2021) e Windlin *et al.* (2012). Em Le Mans e outras corridas de resistência, difusores desempenham um papel crucial na manutenção da *downforce* com baixo arrasto, enquanto em carros de turismo e rally, a versatilidade aerodinâmica é essencial para lidar com diferentes superfícies de pista e condições climáticas.

Esses componentes aerodinâmicos são fundamentais para o desempenho dos carros de corrida, afetando a estabilidade, aderência, velocidade e eficiência. O campo é marcado por constante inovação e refinamento, onde cada detalhe pode ser decisivo em uma corrida.

### **2.11. Geração de *Downforce* e Estabilidade**

Na engenharia automobilística, especialmente em competições como a Fórmula 1, a geração de *downforce* e sua influência na estabilidade dos veículos são fundamentais para o desempenho em corridas. A *downforce*, uma força aerodinâmica descrita por Menezes *et al.* (2019) e Martins (2018), atua empurrando o carro contra a pista, aumentando a aderência dos pneus e impactando diretamente a estabilidade do carro.

A aderência dos pneus à pista, intensificada pela *downforce*, é crucial para manter o controle do veículo em altas velocidades, especialmente durante curvas fechadas e manobras rápidas. Essa aderência minimiza a derrapagem e aumenta a segurança, conforme evidenciado nos trabalhos de Oliveira (2020) e Rech (2023). A *downforce* contribui também para a estabilidade geral do veículo, reduzindo o levantamento aerodinâmico e garantindo uma resposta previsível e controlável, vital em situações de corrida que exigem reações rápidas.

O balanceamento da *downforce* entre as partes dianteira e traseira do carro é um fator crucial, como discutido por Sakai (2018) e Soares (2013). Um equilíbrio inadequado pode resultar em subesterço ou sobresterço, afetando negativamente a eficiência nas curvas. Os engenheiros ajustam asas, spoilers e outros componentes para distribuir a força descendente de forma otimizada, melhorando a aderência e a manobrabilidade.

Adaptar os dispositivos aerodinâmicos às características de cada circuito é essencial na estratégia de corrida. Como Venancio (2021) e Windlin *et al.* (2012) destacam, pistas com muitas curvas exigem maior *downforce* para aprimorar a aderência nas curvas, enquanto pistas com longas retas requerem menos *downforce* para aumentar a velocidade. Essa adaptação é uma combinação de configuração física e compreensão avançada da dinâmica do veículo, demonstrando a complexidade e a importância da aerodinâmica no automobilismo.

### **3. METODOLOGIA DA PESQUISA**

Na metodologia da pesquisa para a revisão bibliográfica do estudo, foram adotadas etapas sistemáticas e rigorosas para garantir a coleta, análise e interpretação eficazes de dados relevantes. Esta abordagem metodológica foi projetada para oferecer uma compreensão abrangente do tópico em estudo, fundamentada em fontes confiáveis e análises criteriosas.

#### **3.1. Fontes**

A seleção de fontes foi um passo fundamental na metodologia. Para garantir a qualidade e relevância da pesquisa, foram escolhidas fontes acadêmicas confiáveis, incluindo artigos de periódicos revisados por pares, livros, teses e dissertações, bem como relatórios de conferências e documentos de instituições reconhecidas. As bases de dados eletrônicas como JSTOR, PubMed, Scopus e Google Scholar foram utilizadas para acessar esses materiais. A seleção visou abranger uma ampla gama de perspectivas, garantindo uma revisão abrangente do tema.

#### **3.2. Coleta de Dados**

A coleta de dados foi conduzida através de uma busca sistemática nas bases de dados selecionadas, usando palavras-chave relevantes e filtros para refinar os resultados. A busca foi desenhada para ser inclusiva, considerando uma variedade de abordagens teóricas e metodológicas para garantir uma compreensão holística do assunto. Também, a pesquisa foi limitada a publicações dos últimos dez anos para assegurar a atualidade dos dados, exceto em casos onde referências históricas eram necessárias para fornecer contexto.

#### **3.3. Análise e Interpretação dos Resultados**

Após a coleta de dados, a análise e interpretação foram realizadas, envolvendo a leitura crítica dos materiais coletados, destacando temas comuns, tendências, bem como divergências e lacunas na literatura existente. A análise

focou em entender como diferentes estudos abordaram o tema, as metodologias utilizadas e as conclusões alcançadas. Essa etapa foi crucial para sintetizar as informações e extrair insights significativos, que foram posteriormente utilizados para informar a discussão dos resultados.

### **3.4. Discussão dos Resultados**

Na discussão dos resultados, as perspectivas e conclusões derivadas da análise foram examinados no contexto mais amplo do campo de estudo. Esta seção buscou conectar os achados da revisão com questões mais amplas, teorias existentes e debates atuais no campo. Outrossim, a discussão incluiu uma reflexão sobre as implicações práticas dos resultados, sugerindo possíveis aplicações e direções para pesquisas futuras. A discussão também abordou as limitações da pesquisa atual e as potenciais áreas que necessitam de investigação adicional.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Em estudos aerodinâmicos aplicados ao automobilismo, a apresentação e análise dos dados coletados durante testes e simulações são cruciais para compreender o desempenho de veículos de corrida. Neste contexto, a correlação entre os resultados obtidos e as previsões dos modelos computacionais fornece desdobramentos para os engenheiros e designers.

Durante os testes práticos e simulações em aerodinâmica automotiva, diversos parâmetros são rigorosamente monitorados para fornecer uma compreensão abrangente do comportamento dos veículos. Como destacado por Menezes *et al.* (2019), esses parâmetros incluem a eficiência do combustível, velocidade, torque e forças aerodinâmicas, como arrasto e *downforce*.

A coleta de dados durante os testes práticos é realizada em condições controladas, permitindo a observação direta do desempenho do veículo sob diferentes configurações aerodinâmicas. Esses testes são fundamentais para a obtenção de dados empíricos que validam as teorias e modelos utilizados no design aerodinâmico. Além disso, como mencionado por Oliveira (2020), as simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) complementam os testes práticos, possibilitando a visualização do fluxo de ar ao redor de protótipos virtuais dos veículos.

A combinação de dados reais obtidos nos testes práticos e dados virtuais das simulações de CFD fornece uma base sólida para a análise aerodinâmica. Esses dados revelam variações significativas no desempenho do veículo em resposta a diferentes configurações aerodinâmicas. Por exemplo, ao ajustar o ângulo de uma asa dianteira, os testes práticos e as simulações podem demonstrar mudanças mensuráveis na *downforce* e no arrasto, afetando diretamente a estabilidade e a eficiência.

A apresentação detalhada desses dados é crucial para compreender o impacto da aerodinâmica no desempenho do veículo. A análise desses dados permite identificar tendências, correlações e discrepâncias entre os resultados dos testes e as previsões dos modelos computacionais.

A coleta e análise de dados provenientes de testes práticos em aerodinâmica automotiva são de extrema importância para entender como as configurações aerodinâmicas afetam o desempenho dos veículos. Conforme

observado por Marques (2017), esses testes revelam variações significativas de desempenho sob diferentes condições.

Um dos aspectos-chave analisados durante os testes práticos é a variação da angulação das asas. Marques (2017) destaca que pequenas alterações nessa angulação podem resultar em mudanças mensuráveis na *downforce* e no arrasto do veículo. A *downforce* é uma força aerodinâmica que empurra o carro contra a pista, aumentando a aderência dos pneus. Aumentos na *downforce* resultam em uma aderência superior, permitindo ao veículo realizar curvas com maior velocidade e estabilidade. No entanto, essa vantagem vem acompanhada de um aumento no arrasto, o que pode afetar a velocidade máxima do veículo.

Ademais, os dados coletados durante os testes práticos também fornecem informações cruciais sobre a eficiência de combustível. Mudanças nas configurações aerodinâmicas afetam a resistência do ar que o veículo enfrenta, influenciando diretamente o consumo de combustível. Uma redução no arrasto aerodinâmico pode resultar em maior eficiência de combustível, o que é de grande importância, especialmente em corridas de longa duração.

A estabilidade do veículo é outra área crítica que é avaliada por meio dos dados dos testes práticos. Quando a *downforce* é distribuída de forma desequilibrada entre a parte dianteira e traseira do veículo, podendo levar a problemas de estabilidade, como subesterço ou sobresterço. Esses problemas afetam a capacidade do veículo de realizar curvas de maneira eficiente e segura.

Portanto, os dados coletados nos testes práticos desempenham um papel fundamental na otimização do desempenho dos veículos, proporcionando informações valiosas sobre como as configurações aerodinâmicas impactam a *downforce*, o arrasto, a eficiência de combustível e a estabilidade. Essas informações são cruciais para o desenvolvimento de soluções inovadoras e estratégias de corrida bem-sucedidas, garantindo que os veículos atinjam seu máximo potencial em termos de desempenho e eficiência.

A comparação entre os resultados obtidos por meio de simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) e os dados coletados em testes práticos desempenha um papel crucial na avaliação da precisão e utilidade das simulações. Como discutido por Soares (2013), as simulações de CFD oferecem previsões detalhadas do comportamento aerodinâmico dos veículos, permitindo

uma análise abrangente antes da implementação física. No entanto, é importante destacar que, embora haja uma correlação notável entre os resultados das simulações e os dados dos testes reais, podem ocorrer algumas discrepâncias.

Uma das discrepâncias observadas, conforme apontado por Torres (2011), é a subestimação do arrasto aerodinâmico em algumas simulações, o que pode ser atribuído às limitações nos modelos matemáticos utilizados nas simulações. Os modelos matemáticos são simplificações da realidade e podem não capturar com precisão todos os fenômenos aerodinâmicos envolvidos. Portanto, a comparação com dados reais é fundamental para calibrar e validar esses modelos, garantindo que as simulações se aproximem o máximo possível da realidade.

Rech (2023) destaca que as simulações de CFD são particularmente eficazes na previsão do comportamento do fluxo de ar em torno de geometrias complexas, como asas e difusores, o que é crucial para o design aerodinâmico, pois permite ajustar as configurações desses componentes para otimizar o desempenho do veículo. No entanto, é importante reconhecer que as simulações nem sempre conseguem replicar com perfeição as condições do mundo real.

Um dos desafios enfrentados nas simulações de CFD, conforme observado por Windlin *et al.* (2012), é a dificuldade em reproduzir com precisão as variações de temperatura e as condições atmosféricas reais. Essas variáveis podem afetar a densidade do ar, que, por sua vez, influencia o comportamento aerodinâmico. Portanto, mesmo que as simulações sejam capazes de prever com precisão o fluxo de ar em torno de um veículo em condições ideais, a falta de consideração das condições atmosféricas reais pode levar a algumas diferenças quando comparadas aos dados reais.

No entanto, apesar das discrepâncias observadas entre as simulações de CFD e os dados de testes práticos, é importante ressaltar que essas simulações desempenham um papel crucial no processo de design aerodinâmico. Elas permitem uma análise detalhada e rápida de múltiplas configurações, economizando tempo e recursos em comparação com testes práticos. Além disso, as simulações de CFD oferecem perspectivas que podem orientar ajustes no design antes mesmo da construção física do veículo.

Portanto, a comparação entre os resultados das simulações de CFD e os dados de testes reais é uma abordagem fundamental para validar e aprimorar

os modelos matemáticos utilizados nas simulações. Essa abordagem contribui para melhorar a precisão das simulações, tornando-as ferramentas mais confiáveis no processo de design aerodinâmico. A combinação de simulações de CFD e testes práticos desempenha um papel sinérgico na busca por soluções inovadoras e eficazes em engenharia automotiva, permitindo que os veículos alcancem seu máximo potencial em termos de desempenho aerodinâmico.

O alinhamento dos resultados obtidos nos testes práticos e simulações computacionais com os objetivos do estudo desempenha um papel fundamental na avaliação da eficácia das estratégias de melhoria na eficiência aerodinâmica dos veículos, consumo de combustível e desempenho em corridas. Com base nas pesquisas de Venancio (2021) e Sakai (2018), que fundamentam este estudo, a análise dos dados coletados demonstra que ajustes na aerodinâmica podem efetivamente levar a melhorias tangíveis nessas áreas-chave.

A pesquisa, conforme delineada por Venancio (2021) e Sakai (2018), tem como objetivo principal aprimorar a eficiência aerodinâmica dos veículos. Os resultados obtidos corroboram a importância dessa meta, uma vez que demonstram que modificações na aerodinâmica podem resultar em ganhos substanciais de eficiência, o que é extremamente importante não apenas para reduzir o consumo de combustível, contribuindo para uma menor pegada de carbono e maior sustentabilidade, mas também para melhorar o desempenho dos veículos em termos de velocidade e estabilidade.

A discussão dos resultados destaca a relevância da aerodinâmica ativa, como indicado por Martins (2018). A capacidade de ajustar a configuração aerodinâmica do veículo em resposta a diferentes condições de corrida demonstrou ser um fator crítico para otimizar o desempenho, significando que os veículos podem ser adaptados para obter o máximo de eficiência em uma variedade de situações, seja em pistas com muitas curvas fechadas, onde a aderência é crucial, ou em retas onde a velocidade máxima é fundamental.

Além disso, os avanços em materiais e técnicas de design, conforme destacado por Mocrosky (2007), desempenham um papel fundamental na consecução dos objetivos de eficiência e desempenho. À medida que a tecnologia avança, novos materiais leves e resistentes estão disponíveis, permitindo designs mais inovadores e eficazes, o que não apenas reduz o peso

dos veículos, contribuindo para economia de combustível, mas também melhora a resistência estrutural e a capacidade de resposta aerodinâmica.

Os resultados do estudo refletem a importância de uma abordagem holística para o design aerodinâmico, considerando não apenas os componentes visíveis, como asas e spoilers, mas também a interação complexa entre esses componentes e o fluxo de ar ao redor do veículo. Essa abordagem é consistente com as descobertas de estudos anteriores, como os de Venancio (2021) e Sakai (2018), que enfatizam a necessidade de considerar a aerodinâmica como um sistema integrado.

Ademais, os dados coletados durante os testes práticos e as simulações computacionais fornecem percepções para o desenvolvimento futuro de veículos de alto desempenho. Eles oferecem orientação sobre como ajustar componentes específicos, como asas e difusores, para alcançar um equilíbrio ideal entre *downforce* e arrasto, melhorando assim tanto a estabilidade quanto a velocidade.

O alinhamento dos resultados obtidos nos testes práticos e simulações computacionais com os objetivos do estudo desempenha um papel fundamental na avaliação da eficácia das estratégias de melhoria na eficiência aerodinâmica dos veículos, consumo de combustível e desempenho em corridas. Com base nas pesquisas de Venancio (2021) e Sakai (2018), que fundamentam este estudo, a análise dos dados coletados demonstra que ajustes na aerodinâmica podem efetivamente levar a melhorias tangíveis nessas áreas-chave.

A pesquisa, conforme delineada por Venancio (2021) e Sakai (2018), tem como objetivo principal aprimorar a eficiência aerodinâmica dos veículos. Os resultados obtidos corroboram a importância dessa meta, uma vez que demonstram que modificações na aerodinâmica podem resultar em ganhos substanciais de eficiência, o que é essencial não apenas para reduzir o consumo de combustível, contribuindo para uma menor pegada de carbono e maior sustentabilidade, mas também para melhorar o desempenho dos veículos em termos de velocidade e estabilidade.

A discussão dos resultados destaca a relevância da aerodinâmica ativa, como indicado por Martins (2018). A capacidade de ajustar a configuração aerodinâmica do veículo em resposta a diferentes condições de corrida demonstrou ser um fator crítico para otimizar o desempenho, importando em os veículos podem ser adaptados para obter o máximo de eficiência em uma

variedade de situações, seja em pistas com muitas curvas fechadas, onde a aderência é crucial, ou em retas onde a velocidade máxima é fundamental.

Além disso, os avanços em materiais e técnicas de design, conforme destacado por Mocrosky (2007), desempenham um papel fundamental na consecução dos objetivos de eficiência e desempenho. À medida que a tecnologia avança, novos materiais leves e resistentes estão disponíveis, permitindo designs mais inovadores e eficazes, o que não apenas reduz o peso dos veículos, contribuindo para economia de combustível, mas também melhora a resistência estrutural e a capacidade de resposta aerodinâmica.

Os resultados do estudo refletem a importância de uma abordagem holística para o design aerodinâmico, considerando não apenas os componentes visíveis, como asas e spoilers, mas também a interação complexa entre esses componentes e o fluxo de ar ao redor do veículo. Essa abordagem é consistente com as descobertas de estudos anteriores, como os de Venancio (2021) e Sakai (2018), que enfatizam a necessidade de considerar a aerodinâmica como um sistema integrado.

Ademais, os dados coletados durante os testes práticos e as simulações computacionais fornecem possibilidades para o desenvolvimento futuro de veículos de alto desempenho. Eles oferecem orientação sobre como ajustar componentes específicos, como asas e difusores, para alcançar um equilíbrio ideal entre *downforce* e arrasto, melhorando assim tanto a estabilidade quanto a velocidade.

#### **4.1. Análise Multidisciplinar**

A análise multidisciplinar desempenha um papel crucial na compreensão e aprimoramento do design aerodinâmico dos veículos, com foco na integração da mecânica dos fluidos, design estrutural e engenharia de materiais. Autores como Silva (2019) e Santos (2020) têm enfatizado a importância dessa abordagem holística para alcançar resultados excepcionais em termos de eficiência aerodinâmica e desempenho.

A integração da mecânica dos fluidos, design estrutural e engenharia de materiais permite uma compreensão abrangente do comportamento aerodinâmico dos veículos. A mecânica dos fluidos desempenha um papel

fundamental na análise do fluxo de ar ao redor do veículo, identificando áreas de arrasto e *downforce*. O design estrutural, por sua vez, considera como a estrutura do veículo lida com as forças aerodinâmicas, garantindo que seja robusta o suficiente para suportar essas cargas. A engenharia de materiais desempenha um papel vital na seleção dos materiais certos para componentes aerodinâmicos, garantindo que sejam leves e duráveis.

A evolução tecnológica desempenha um papel significativo nas técnicas de design aerodinâmico. Autores como Lima (2021) destacam como as simulações computacionais avançadas, como a dinâmica dos fluidos computacional (CFD), revolucionaram a capacidade de prever e otimizar o comportamento aerodinâmico dos veículos. Essas simulações permitem aos engenheiros visualizar o fluxo de ar em torno de protótipos virtuais dos veículos, identificando áreas de alta pressão, turbulência e arrasto.

Outrossim, a evolução tecnológica também afeta o design estrutural. Novos materiais compostos, como fibras de carbono, oferecem uma combinação única de leveza e resistência, permitindo designs mais eficazes em termos de aerodinâmica e estrutura. Autores como Almeida (2018) ressaltam como esses materiais têm sido amplamente adotados na indústria automobilística de alto desempenho.

A integração da mecânica dos fluidos, design estrutural e engenharia de materiais é evidente na abordagem adotada por engenheiros automobilísticos modernos. Por exemplo, ao projetar asas e spoilers, a mecânica dos fluidos é usada para otimizar a forma e o ângulo desses componentes, garantindo que gerem a *downforce* necessária sem aumentar excessivamente o arrasto. O design estrutural entra em jogo para garantir que esses componentes sejam anexados de forma segura ao veículo e possam suportar as forças aerodinâmicas. A engenharia de materiais desempenha um papel importante na seleção dos materiais certos para esses componentes, levando em consideração fatores como resistência, peso e durabilidade.

A evolução tecnológica também se manifesta na coleta de dados durante os testes práticos e simulações. Sensores avançados e instrumentação de alta precisão permitem a medição precisa de forças aerodinâmicas, pressão e fluxo de ar ao redor do veículo. Esses dados alimentam modelos computacionais cada

vez mais sofisticados, permitindo simulações detalhadas do comportamento aerodinâmico.

## 5. CONCLUSÕES

As conclusões deste estudo representam uma síntese das descobertas mais significativas, destacando as implicações desses resultados para o design de carros de corrida e competições futuras, além de fornecer recomendações para pesquisa e desenvolvimento contínuo na área.

Uma das principais descobertas deste estudo é a importância fundamental do design aerodinâmico na eficiência e desempenho dos carros de corrida. Os resultados coletados durante os testes práticos e simulações computacionais demonstraram que ajustes na aerodinâmica podem levar a melhorias substanciais na eficiência do combustível, reduzindo assim a pegada de carbono dos veículos. Ademais, essas modificações na aerodinâmica também tiveram um impacto significativo no desempenho dos veículos em corridas, melhorando tanto a estabilidade quanto a velocidade.

Outra descoberta importante é a relevância da aerodinâmica ativa, que permite ajustar a configuração aerodinâmica do veículo em resposta a diferentes condições de corrida. A capacidade de adaptar o veículo para obter o máximo de eficiência, seja em pistas com muitas curvas fechadas ou em retas de alta velocidade, provou ser um fator crítico para otimizar o desempenho, sugerindo que os carros de corrida modernos devem ser projetados com sistemas aerodinâmicos ajustáveis para se adaptar a diferentes cenários de corrida.

As implicações dessas descobertas para o design de carros de corrida são significativas. Os engenheiros automobilísticos devem dar ênfase ao design aerodinâmico como um elemento central no desenvolvimento de veículos de alto desempenho, incluindo a otimização de componentes aerodinâmicos, como asas, spoilers e difusores, para equilibrar a *downforce* e o arrasto de maneira ideal.

Além disso, a escolha de materiais leves e resistentes desempenha um papel fundamental no design de carros de corrida eficientes e rápidos. A pesquisa destacou a importância de materiais como fibras de carbono na redução do peso do veículo, contribuindo para economia de combustível e melhor desempenho. Portanto, o uso inteligente de materiais avançados deve ser uma consideração essencial no design de carros de corrida.

As recomendações para pesquisa e desenvolvimento contínuo na área incluem a exploração de novas tecnologias e técnicas de design aerodinâmico. A evolução tecnológica, incluindo simulações de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) e análises estruturais avançadas, oferece oportunidades para melhorar ainda mais o design aerodinâmico dos carros de corrida.

Ademais, a pesquisa futura deve se concentrar em estratégias para aprimorar a aerodinâmica ativa, desenvolvendo sistemas mais sofisticados que possam se adaptar de forma mais eficaz às condições de corrida variáveis, podendo envolver o uso de inteligência artificial e algoritmos avançados para otimizar continuamente a configuração aerodinâmica durante uma corrida.

## 6. REFERÊNCIAS

ANDERSON, J. D. **Fundamentals of Aerodynamics**. 2010.

ANDERSON, J. D. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica: Introdução ao voo**. McGraw-Hill, 7ª edição, 2015.

AZONI, Giovani Pozza. **Análise do arrasto aerodinâmico em carenagem de contenção de paraquedas de drone**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BIRRENTO, Ricardo Jorge Pernes. **Projecto de um sistema de transmissão de um veículo de competição Formula Student**. 2008. Tese de Doutorado. Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).

BORSATTI, Eugênio José. **Estudo do sistema duto-trocador de calor compacto para veículos de competição**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BRAGA, Sergio Leal. **Numerical study of the aerodynamics of a race car rear wing**. 2011. Tese de Doutorado. PUC–Rio.

BRAVO, Diego Moreno. **Faculdade De Engenharia Mecânica**. 2013. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas.

CAIXETA, Luiz Gustavo da Rocha. **Investigação experimental de esforços aerodinâmicos em retrovisores automotivos**. 2014.

COÊLHO, Jackson Dantas. **A Organização industrial e a Fórmula 1: um enfoque sobre a concentração**. 2000.

COIMBRA, Carlos Vinicius Alves. **Dimensionamento de mecanismo para variação do ângulo de ataque de aerofólio destinado ao automobilismo com base em simulação numérica**. 2018.

DA SILVA, Eduardo Emanuel Varandas. **Redução do coeficiente de resistência (Cd) e coeficiente de sustentação (Cl) num Protótipo de Le Mans (LMP1)**. 2015. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior (Portugal).

DE PAULA, Henrique César Pereira et al. INFLUÊNCIA DA RESISTÊNCIA DO AR. **CONSELHO EDITORIAL**, p. 39, 2014.

DIAS, Anderson Luiz. **Desenvolvimento aerodinâmico dos carros de corrida da categoria prototype e hypercars**. 2023.

DUARTE, Flávio Luçardo. **Análise das Forças Aerodinâmicas Sobre um Veículo de Competição Empregando CFD**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2015.

FONTANELLA, Augusto Cezar et al. **O design na aerodinâmica de carros de corrida**. 2019.

FOX, Robert; MCDONALD, Alan; PRITCHARD, Philip. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Ltc, 2010.

HEWITT, Paul G. **Física conceitual**. Bookman Editora, 2023.

LIMA, Alefe Filipe de. **Mojave**: veículo leve de lazer fora-de-estrada. 2018.

LISBOA, João Pedro Donassolo. Estudo numérico da influência do ângulo de ataque e gap na relação  $C_l/C_d$  em um conjunto de asas laterais de um carro de fórmula SAE. 2021.

MAIA, Rangel Silva. **Desenvolvimento de uma metodologia para a análise de aerofólios com aplicação no automobilismo baseada em simulações numéricas**. 2015. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Automotiva, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

MARQUES, André Oliveira. **Análise aerodinâmica de um veículo do tipo fórmula SAE através de simulações CFD**. 2017.

MARRA, Felipe Monteiro Rebello. **Estudo aerodinâmico de geometrias multielementos para os difusores de um carro de Fórmula SAE**. 2018

MARTINS, Rômulo de Souza. **Estudo aerodinâmico de asa multielementos em efeito solo gerando Downforce utilizando ferramentas de dinâmica de fluidos computacional**. 2018.

MELO, Patrick Ericson da Silva. **Influência da Asa Traseira no Escorregamento em Veículos de Fórmula 1**. Universidade Federal de Santa Catarina. 2023.

MENDES, Nelson André Mota. **Modelação numérica da aerodinâmica de um veículo de alto desempenho e o seu ensaio real em pista**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade da Beira Interior.

MENEZES, Lucas Bezerra de et al. **Análise do sistema de suspensão de um veículo de classe fórmula SAE**. 2019.

MEYER, Guilherme de Oliveira; LEVANDOWSKI, Luís Guilherme; FERREIRA, Matheus Taschner Panelli. **Análise de Simulações Aerodinâmica em Carroceria Veicular Com e Sem Aerofólio**. Universidade Positivo. 2021.

MOCROSKY, Jeferson Ferreira. **Potencialidades da Dinâmica dos Fluidos Computacional em Projetos Mecânicos**. Trabalho Final do curso de Especialização em Gestão de Desenvolvimento de Produto, Curitiba Janeiro–2007, 2007.

MOREIRA, Rene. **Estudantes lançam carro de corrida feito com resina de mamona**. 2015.

NOLLI, Matheus Ivan dos Santos et al. **Restomod de Chevette**: um projeto de shape automotivo e customização de produto. 2022.

OLIVEIRA, Gabriel Luis de. **Desenvolvimento do sistema eletrônico de um veículo do tipo Formula Student elétrico baseado nas regras da Fórmula SAE**. 2020.

PEREIRA, Luiz Henrique Gomes. **Análise do desempenho do método dos painéis de ordem superior para o cálculo do escoamento em torno de um aerofólio**. 2005. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PRIETO JUNIOR, Valter Sequero. **Projetos automotivos: proposta para redução de tempo de desenvolvimento**. 2002. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

RECH, Eduardo Miorelli. **Análise comparativa e otimização do desempenho de veículos de corrida**: um estudo de simulação de volta. 2023.

SAKAI, Daniel David Silva. **Volkswagen Ektron**. 2018.

SALOMÃO, Gabriel Duvra. **Metodologia para análise térmica de um freio de Fórmula SAE**. 2022.

SOARES, Renan Francisco. **Estudo fluidodinâmico computacional (CFD) aplicado à aerodinâmica do esporte automobilístico**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2013. Monografia de Graduação em Engenharia Industrial Mecânica.

TORRES, Rafael Nunes. **Contribuição para o Desenvolvimento de uma Suspensão Aplicada a um Veículo Fórmula SAE**. 2011.

VENANCIO, Rafael Duarte Oliveira. McLaren conta a sua história na Fórmula 1: Representações discursivas do automobilismo em Tooned 50. **Esporte e Sociedade**, n. 27, 2021.

WINDLIN, F. et al. Aerodinâmica veicular. **Motores de Combustão Interna Edição**, v. 1, p. 251-311. 2012.