



# PROJETO DE GRADUAÇÃO

## Validação Experimental de *Downforce* de um Protótipo de Fórmula SAE

Por  
Régis Santana Rocha

Brasília, maio de 2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

## PROJETO DE GRADUAÇÃO

# Validação Experimental de *Downforce* de um Protótipo de Fórmula SAE

Por  
**Régis Santana Rocha**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico

### **Banca Examinadora**

Orientador: Prof. Luís Augusto Conte Mendes Veloso, UnB/ENM \_\_\_\_\_  
Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ENM \_\_\_\_\_  
Prof. Adriano Possebon Rosa, UnB/ENM \_\_\_\_\_

Brasília, maio de 2021

### **Dedicatória**

Este trabalho é dedicado à todas as equipes de Fórmula SAE do Brasil. Deixo aqui a minha contribuição para o desenvolvimento da Engenharia do nosso país.

## Agradecimentos

*Sou muito grato à minha família por ter me dado, com muito esforço, todas as condições para que eu pudesse estudar e me tornar quem eu sou hoje. O esforço e o incentivo deles me fazem ter o privilégio de estudar em uma das melhores universidades do país na minha área, sem me desconectar das minhas origens.*

*Quero agradecer também o meu Professor Orientador Luis Augusto Veloso por toda disponibilidade, dedicação, paciência e esforço para que este trabalho dê certo. O meu interesse pela mecânica experimental começou quando fiz a sua disciplina desse mesmo nome.*

*Não posso esquecer de agradecer todas as pessoas com as quais trabalhei durante a minha passagem pela Apuama Racing. Antes de fazer parte da equipe, eu era apenas um "aluno de engenharia" esforçado. Hoje, sou um Engenheiro em Formação muito mais capacitado tecnicamente e pessoalmente. Afinal, antes de ser um Engenheiro em Formação, eu também sou um ser humano, e qualquer profissional que deseja crescer na sua carreira precisa sempre lembrar-se disso.*

*Por fim, gostaria de agradecer à todos os meus amigos por sempre me apoiarem e me acompanharem nessa jornada.*

*Régis Santana Rocha*

## Resumo

Este trabalho apresenta a validação experimental da carga aerodinâmica vertical descendente (*Downforce*) do protótipo de Fórmula SAE, da equipe Apuama Racing, da Universidade de Brasília. Dois métodos de medição foram utilizados para a geração de dados para o cálculo das forças. Um deles, foi a medição da variação das alturas de passeio (*Ride Heights*) do veículo, utilizando transdutores de deslocamento à laser, e o outro foi a medição dos deslocamentos dos amortecedores, através de potenciômetros lineares instalados nos mesmos. A partir das medições, o *downforce* pôde ser calculado e comparado com a simulação de Fluidodinâmica Computacional já realizada durante o projeto do carro. Observou-se que os dispositivos aerodinâmicos projetados cumprem o seu propósito, exercendo importante efeito no comportamento dinâmico do carro. Em relação as medições dos transdutores de deslocamento à laser, e dos potenciômetros, o valor de carga total calculado por simulação apresentou um desvio de 9,3% e 6,1%, respectivamente. Esses resultados mostraram-se bastante satisfatórios, considerando todas as fontes de incerteza contidas no projeto do veículo, na sua construção e na realização dos testes. Foi observado que, abaixo de 40 km/h, a carga aerodinâmica não apresenta níveis passíveis de serem medidos através dessas metodologias. A 100 km/h, a força gerada ultrapassou os 1000 Newtons, indicando que os dispositivos aerodinâmicos do veículo são realmente capazes de gerar altas cargas. Não foi possível notar diferença significativa comparando as forças calculadas através dos dados obtidos nos dois métodos, indicando que a deformação dos pneus com a carga é pequena.

**PALAVRAS CHAVE:** Downforce, Fórmula SAE, Validação Experimental, Aerodinâmica.

## **Abstract**

This work presents the experimental validation of the Downforce of the Formula SAE prototype, by the Apuama Racing team, at the University of Brasília. Two measurement methods were used to generate data for the calculation of forces. One of them was the measurement of the variation of the ride heights of the vehicle, using laser displacement transducers, and the other was the measurement of the displacements of the shock absorbers, through linear potentiometers installed in them. From the measurements, the Downforce could be calculated and compared with the Computational Fluid Dynamics simulation already performed during the car's design. It was observed that the designed aerodynamic devices fulfill their purpose, exerting an important effect on the car's dynamic behavior. Regarding the measurements of laser displacement transducers and potentiometers, the total load value calculated by simulation presented a deviation of 9.3% and 6.1%, respectively. These results proved to be quite satisfactory, considering all the sources of uncertainty contained in the vehicle's design, construction and testing. It was observed that, below 40 km/h, the aerodynamic load does not present levels that can be measured using these methodologies. At 100 km/h, the force generated exceeded 1000 Newtons, indicating that the vehicle's aerodynamic devices are indeed capable of generating high loads. It was not possible to notice a significant difference comparing the forces calculated through the data obtained in the two methods, indicating that the deformation of the tires with the load is small.

**KEYWORDS: Downfoce, Formula SAE, Aerodynamics, Experimental Validation.**

# Sumário

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>viii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO . . . . .	1
1.1.1 A Competição . . . . .	1
1.1.2 A equipe . . . . .	2
1.2 MOTIVAÇÃO . . . . .	3
1.3 OBJETIVO . . . . .	4
1.4 DIVISÃO DO TRABALHO . . . . .	4
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>6</b>
2.1 INTRODUÇÃO . . . . .	6
2.1.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS . . . . .	7
2.1.2 Fluido . . . . .	7
2.1.3 Princípio de Bernoulli . . . . .	9
2.1.4 Número de Reynolds . . . . .	10
2.1.5 Centro de Pressão . . . . .	11
2.1.6 Forças Aerodinâmicas . . . . .	11
2.1.7 Coeficientes . . . . .	13
2.2 AERODINÂMICA NO AUTOMOBILISMO . . . . .	14
2.2.1 Dispositivos Geradores de <i>downforce</i> . . . . .	14

---

2.2.1.1	Assoalho . . . . .	14
2.2.1.2	Asas . . . . .	15
2.2.1.3	Pacote Aerodinâmico . . . . .	17
2.3	DINÂMICA VEICULAR . . . . .	18
2.3.1	O Efeito da Aerodinâmica . . . . .	19
2.3.1.1	Efeito na Aceleração . . . . .	20
2.3.1.2	Efeito na frenagem . . . . .	20
2.3.1.3	Efeito na Capacidade de Curva . . . . .	21
2.3.1.4	Efeito nas acelerações . . . . .	22
2.4	Métodos Experimentais para Obtenção de <i>downforce</i> . . . . .	24
2.4.1	Estimativa Através do Coeficiente de <i>downforce</i> . . . . .	24
2.4.2	Cálculo Através das Alturas de Passeio . . . . .	26
2.4.2.1	Medição Direta - Cálculo das Forças e Alturas de Passeio . . . . .	27
2.4.2.2	Medição Indireta . . . . .	28
2.4.2.3	Cálculo do Balanço Aerodinâmico e do Coeficiente de <i>downforce</i> . . . . .	29
2.4.3	Medição Direta por Célula de Carga . . . . .	29
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>31</b>
3.1	Aparato Experimental . . . . .	31
3.1.1	Transdutor de Deslocamento à Laser . . . . .	31
3.1.2	Potenciômetro Linear . . . . .	33
3.1.3	AiM EVO4S . . . . .	34
3.1.4	FuelTech FT600 . . . . .	35
3.1.5	Medida de Condições Climáticas . . . . .	36
3.1.6	Calibração do Transdutor de Deslocamento à Laser . . . . .	37
3.1.7	Calibração Potenciômetro Linear . . . . .	39
3.1.8	Montagem . . . . .	40
3.2	Procedimento Experimental . . . . .	41
3.2.1	Local de Testes . . . . .	41



---

3.2.2	Taxa de Amostragem . . . . .	43
3.2.3	Pré-teste . . . . .	43
3.2.4	Teste . . . . .	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>48</b>
4.1	Simulação de Fluidodinâmica Computacional (CFD) . . . . .	48
4.1.1	Resultados dos testes em pista . . . . .	52
4.1.2	Medições a 40 km/h . . . . .	53
4.1.3	Medições a 100 km/h . . . . .	55
4.1.4	Comparação dos Resultados . . . . .	56
4.2	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS . . . . .	59
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>61</b>

## LISTA DE FIGURAS

1	Competição de Fórmula SAE (APUAMA, 2018) . . . . .	1
2	Equipe de 2018 (APUAMA, 2018) . . . . .	2
3	AF20 - Carro atual da equipe (APUAMA, 2019) . . . . .	3
4	<i>Falcon Heavy - SpaceX</i> (MATOS, 2018) . . . . .	6
5	Aerodinâmica na Fórmula 1 (F1 TECHHUB, 2019) . . . . .	7
6	Forças normal e cisalhante na superfície de um elemento fluido (CENGEL; CIMBALA, 2015) -ADAPTADO . . . . .	8
7	Camada Limite (SOLIDWORKS, 2019) . . . . .	9
8	Ilustração de um escoamento ao redor de um aerofólio. (ANDERSON, 2015) - ADAPTADO . . . . .	9
9	Campo de Pressão ao redor de um Aerofólio (ANAND, 2014) . . . . .	11
10	Forças Aerodinâmicas (ANGLE, 2018)- Adaptado . . . . .	12
11	Comparação entre arrasto de pressão e de fricção para vários formatos de corpos (TALAY, 1975) . . . . .	13
12	Diferença entre sustentação e <i>downforce</i> . . . . .	14
13	Ilustração do efeito solo (GROUND, 2008) . . . . .	15
14	Asa traseira de um carro de Fórmula 1 (TECHNICAL, 2019) . . . . .	16
15	Asa Dianteira de um carro de FSAE (MCGILL, 2015) . . . . .	16
16	Variação do coeficiente de sustentação com a altura da asa (KATZ, 1995) .	17
17	Influência dos dispositivos aerodinâmicos no arrasto e no <i>downforce</i> de um Fórmula 1 de 2009 (TOET, 2013) . . . . .	18
18	Sistema de coordenadas adotado (SAE International, 2008) . . . . .	19
19	Potência absorvida pelo arrasto (MCBEATH, 2017) - ADAPTADO . . . .	20

20	Efeito do <i>downforce</i> na distância de frenagem em função da velocidade inicial (KATZ, 1995) - ADAPTADO . . . . .	21
21	Velocidade em função do raio de curva para diferentes coeficientes de <i>downforce</i> (KATZ, 1995) . . . . .	22
22	Diagrama G-G para pneu individual (SEWARD, 2014) . . . . .	23
23	Efeito do <i>downforce</i> no diagrama gg (KATZ, 1995) - ADAPTADO . . . . .	24
24	Tubo de Pitot instalado em um carro de Fórmula 1 (F1 TECHNICAL, 2013) - ADAPTADO . . . . .	25
25	Teste em Túnel de Vento com modelo em escala (KONELEK, 2016) . . . . .	25
26	Posição das alturas de passeio (PETRIC, 2020) - ADAPTADO . . . . .	26
27	Sensores para medição de altura de passeio. (a) Potenciômetro linear (MCBEATH, 2017). (b) Sensor de altura de passeio (GALIMI, 2018) . . . . .	27
28	Parâmetros para cálculo das alturas de passeio (SEGERS, 2014) . . . . .	27
29	Célula de carga instalada no tubo de alavanca da suspensão (MCBEATH, 2017) . . . . .	30
30	Transdutor de deslocamento à laser, modelo OADM 12I6430/S35A. (BAUMER, 2017) . . . . .	32
31	Sensores laser instalados. . . . .	32
32	Potenciômetro linear - modelo LT. (GEFRAN, 2015) . . . . .	33
33	Potenciômetros instalados na suspensão traseira . . . . .	34
34	AiM EVO4S. (Fonte: Motorsport Store) . . . . .	35
35	FT600. (Fonte: FuelTech) . . . . .	36
36	Equipamentos utilizados para medição das condições de tempo durante o teste. . . . .	37
37	Procedimento de calibração do transdutor de deslocamento laser. . . . .	38
38	Curva de calibração do transdutor de deslocamento laser. . . . .	38
39	Procedimento de calibração do potenciômetro linear. . . . .	39
40	Curva de calibração do potenciômetro linear. . . . .	40
41	Ilustração das conexões entre sensores e centrais. . . . .	41
42	Autódromo Internacional Nelson Piquet. (Fonte: Google Earth) . . . . .	42
43	Trecho escolhido para o teste. (Fonte: Google Earth) . . . . .	43

---

44	Aquecimento pré-teste. . . . .	44
45	Checagem de sinal dos potenciômetros pré-teste. . . . .	45
46	Trechos percorridos à 40 e 100 km/h . . . . .	46
47	Modelo simplificado para simulação CFD (APUAMA RACING, 2021) . . .	49
48	Malha construída para simulação. (a) Discretização do carro inteiro. (b) Discretização da asa dianteira. (APUAMA RACING, 2021) . . . . .	49
49	Distribuição de pressão ao longo do carro. (APUAMA RACING, 2021) . .	50
50	Gráficos gerados na simulação. (a) Convergência de <i>downforce</i> . (b) Resí- duos. (APUAMA RACING, 2021). . . . .	51
51	Velocidade e <i>downforce</i> plotados na pista de teste. . . . .	52
52	Intervalos usados para a cálculo da carga a 40 km/h . . . . .	53
53	Intervalos usados para a cálculo da carga a 100 km/h . . . . .	55
54	<i>Downforce</i> por trecho: Comparação entre os métodos de medição . . . . .	56
55	Balço por trecho: Comparação entre os métodos de medição . . . . .	57
56	Deslocamento: comparação entre amortecedores . . . . .	58
57	Coefficiente de <i>Downforce</i> por trecho: Comparação entre os métodos de medição . . . . .	58

## LISTA DE TABELAS

1	Especificações técnicas do transdutor de deslocamento laser. . . . .	32
2	Especificações Técnicas do potenciômetro Linear . . . . .	33
3	Especificações técnicas do anemômetro. . . . .	37
4	Especificações técnicas do termômetro infravermelho. . . . .	37
5	Condições de climáticas medidas durante o teste. . . . .	47
6	Parâmetros para definição das condições de contorno do problema. . . . .	50
7	Resultados da simulação a 100 km/h . . . . .	51
8	Resultados da simulação a 40 km/h. . . . .	51
9	Resultados calculados a partir das medições feitas pelos sensores laser. . . .	54
10	Resultados calculados a partir das medições feitas pelos potenciômetros. . .	54
11	Resultados calculados a partir das medições feitas pelos sensores laser. . . .	56
12	Resultados calculados a partir das medições feitas pelos potenciômetros. . .	56
13	Diferença da simulação em relação as medições. . . . .	59

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	Área
$a$	Aceleração
$c$	Comprimento Característico
$D$	Força de Arrasto
$F_y$	Força Lateral
$F_z$	Força Vertical
$g$	Gravidade
$IR$	Razão de Instalação
$K_{rr}$	Rigidez total de um quarto de carro em cada eixo
$L$	Força de Arrasto
$p$	Pressão
$P_{absorvida}$	Potência Absorvida
$RH$	Ride Height
$v$	Velocidade
$W$	Peso do Carro
$z$	Coordenada $z$

## Símbolos Gregos

$\chi$	Deslocamento
$\Delta$	Variação

$\mu$  Viscosidade Dinâmica

$\rho$  Densidade

### **Grupos Adimensionais**

$C_D$  Coeficiente de Arrasto

$C_L$  Coeficiente de Sustentação

$Re$  Número de Reynolds

### **Subscritos**

$\infty$  Escoamento não Perturbado

$cg$  Centro de Gravidade

$F$  Frontal

$FL$  Frontal Esquerda

$FR$  Frontal Direita

$R$  Traseira

$x$  Direção Longitudinal

rolling Dinâmico

static Estática

# CAPITULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

#### 1.1.1 A Competição

A Fórmula SAE (*Society of Automotive Engineers*) iniciou-se em 1980, na Universidade do Texas. O principal objetivo era dar aos estudante de engenharia a possibilidade de ter um contato mais próximo com a indústria automotiva. De lá para cá, a competição passou a ter versões fora dos Estados Unidos. Países como Alemanha, Brasil, Japão e Austrália têm suas próprias competições nacionais (CASE, 1995). As duas instituições responsáveis por sancionar e organizar os eventos, são a SAE e o IMeche (*Institution of Mechanical Engineerings*).



Figura 1: Competição de Fórmula SAE (APUAMA, 2018)



O carro e os estudantes são testados de várias formas. A competição começa com uma inspeção técnica do veículo, para que se garanta que todas as regras do regulamento da competição foram atendidas. Nesta fase, todos os itens de segurança do carro e dos pilotos são checados, para que tudo ocorra sem risco de acidentes. As equipes que são aprovadas na inspeção técnica, podem participar de dois tipos de prova: as estáticas, e as dinâmicas. As estáticas têm o foco de avaliar como as decisões de projeto foram tomadas e como equipe se organizou em termos de gestão de custos, manufatura e conhecimento. Já as provas dinâmicas tem o objetivo de avaliar o comportamento do carro em pista.

Já nas provas dinâmicas, pontua mais a equipe que for mais rápida, ou seja, que consiga percorrer os circuitos no menor tempo possível.

Um projeto tem duração de 2 anos. Ou seja, a cada dois anos o carro deve ser reprojetoado e reconstruído do zero. O regulamento especifica que, do primeiro para o segundo ano, alterações significativas devem ser feitas no carro.

### 1.1.2 A equipe

Uma das equipes que representam a Universidade de Brasília na Fórmula SAE Brasil, é a Apuama Racing (Figura 2), fundada em 2004. A Figura 3 mostra o carro atual, o AF20



Figura 2: Equipe de 2018 (APUAMA, 2018)



Figura 3: AF20 - Carro atual da equipe (APUAMA, 2019)

Atualmente a equipe conta com mais de 40 membros, e compete todos os anos pela FSAE Brasil. A Apuama Racing representa o Campus Darcy Ribeiro na categoria Combustão.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

No automobilismo, a informação é essencial para tomada de decisões. Quanto mais dados se tem a respeito do carro, melhores decisões podem ser tomadas, tanto a respeito do projeto, quanto das estratégias e configurações do carro na pista (SEGRS, 2014).

No contexto da Fórmula SAE, os dados são de extrema importância. Eles são usados tanto para verificar os modelos matemáticos e simulações computacionais realizadas durante o projeto do veículo, quanto para monitorar o bom funcionamento do carro na pista.

A medição das cargas aerodinâmicas, por exemplo, dá a possibilidade de verificar a validade das simulações de Fluidodinâmica Computacional (CFD) do veículo. Essas medições possibilitam o desenvolvimento de projeto cada vez mais otimizado, além de ser uma excelente fonte de aprendizado para os estudantes envolvidos.

A Aerodinâmica tem grande importância para os carros de corrida, pois ela possi-

bilita a geração de mais aderência dos pneus com o solo, sem ganho adicional significativo de massa, fazendo com que as curvas possam ser feitas a velocidades cada vez maiores (SEWARD, 2014).

A equipe já vem trabalhando em um projeto aerodinâmico do carro desde 2015, porém nem as cargas, nem os coeficientes foram verificados por meio de medições em pista. Assim mesmo, o projeto aerodinâmico foi sendo desenvolvido por meio de cálculos teóricos e simulação computacional.

Desta forma, faz-se necessária a aquisição de dados para determinação do *downforce* (carga vertical descendente) gerado pela Aerodinâmica do AF20, e posterior comparação com a simulação computacional.

## 1.3 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho, é fazer a validação do *downforce* (carga aerodinâmica vertical descendente) total do protótipo AF20, da equipe Apuama Racing. A validação será realizada através da medição dos parâmetros necessários para o cálculo da carga, e da comparação com as simulações CFD realizadas durante a fase projeto.

As simulações computacionais foram realizadas através da ferramenta *Fluent*, do *Software Ansys*. E a aquisição dos dados necessários para cálculo das cargas será realizada através de sensores instalados no veículo. Todos os testes serão feitos em um trecho da pista do Autódromo de Brasília.

Os objetivos específicos são:

- Obter e comparar a distribuição do *downforce* em cada eixo do carro;
- Estimar o coeficiente de *downforce*;

## 1.4 DIVISÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido da seguinte forma:

- Capítulo 1: **Introdução:** Contextualização, Motivação, Objetivos, Divisão do Trabalho;
- Capítulo 2: **Fundamentação Teórica:** Introdução, Aerodinâmica no Automobilismo, Dinâmica Veicular, Métodos Experimentais para Obtenção de *Downforce*;
- Capítulo 3: **Metodologia** Aparato Experimental, Procedimento Experimental;

- Capítulo 4: **Resultados:** Resultados, Conclusão.

## CAPITULO 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Rodrigues (2013) define Aerodinâmica como o estudo do movimento de fluidos gasosos, relativo às suas propriedades e características, e às forças que exercem em corpos sólidos neles imersos.

De fato, os efeitos causados pela interação entre o ar e um corpo em movimento (e vice-versa), são objetos de estudo da Aerodinâmica.

São várias as aplicações desta ciência no mundo atual. Elas vão desde um simples aspirador de pó, até foguetes como o *Falcon Heavy* (Figura 4), foguete reutilizável, projetado e produzido pela empresa *SpaceX*.



Figura 4: *Falcon Heavy* - *SpaceX* (MATOS, 2018)

Uma outra aplicação bem conhecida, é no mundo dos carros de corrida. A Fórmula 1, por exemplo, é uma das categorias do automobilismo que mais tiram proveito da

Aerodinâmica (Figura 5). Apesar de serem aplicações distintas, os mesmos conceitos fundamentais são necessários para entendê-las.



Figura 5: Aerodinâmica na Fórmula 1 (F1 TECHHUB, 2019)

### 2.1.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

#### 2.1.2 Fluido

Diferentemente dos sólidos, os fluidos são substâncias (líquidas ou gasosas) que não apresentam resistência significativa a esforços cisalhantes. Quando sujeito a força de cisalhamento, o sólido se deforma até um certo limite. Já o fluido, deforma-se continuamente enquanto a força é aplicada (CENGEL; CIMBALA, 2015).

Na superfície de um elemento fluido, a tensão pode ser dividida em duas componentes, a normal e a tangencial.

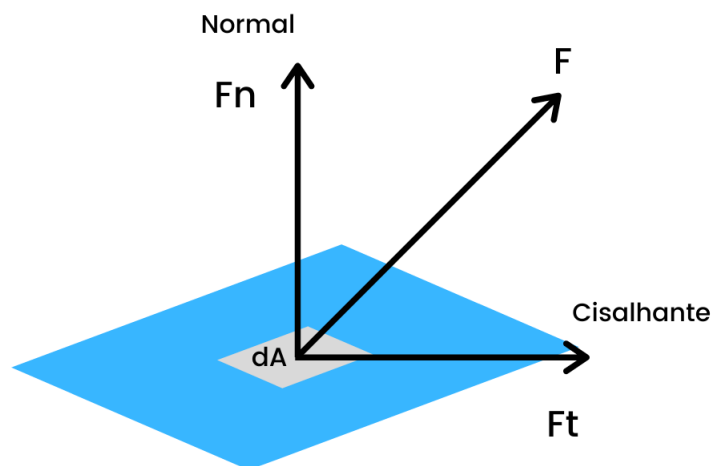


Figura 6: Forças normal e cisalhante na superfície de um elemento fluido (CENGEL; CIMBALA, 2015) -ADAPTADO

As forças e momentos aerodinâmicos têm origem na distribuição de pressão e na tensão cisalhante sobre a superfície dos corpos (ANDERSON, 2010).

Uma outra propriedade importante para a mecânica dos fluidos é a Viscosidade. Ela pode ser entendida como a resistência interna do líquido ao movimento ou à “fluidéz”(CENGEL; CIMBALA, 2015). Por conta da viscosidade, quando um fluido interage com a superfície de um corpo, ocorre a formação da Camada Limite, devido à condição de não deslizamento. Nessa condição, as partículas de fluido que estão próximas a superfície do corpo tendem a aderir a ela, adquirindo velocidade relativa nula.

A partir do momento em que a primeira camada de fluido adquire velocidade relativa nula, este efeito também é transmitido às camadas adjacentes. A Camada Limite abrange a região que se inicia na superfície do corpo, e se estende até uma altura na qual os efeitos da viscosidade não são mais significativos (Figura 7).

Na Camada Limite, a energia cinética do fluido é convertida em calor. No entanto, o calor gerado é insignificante neste contexto (MCBEATH, 2017).

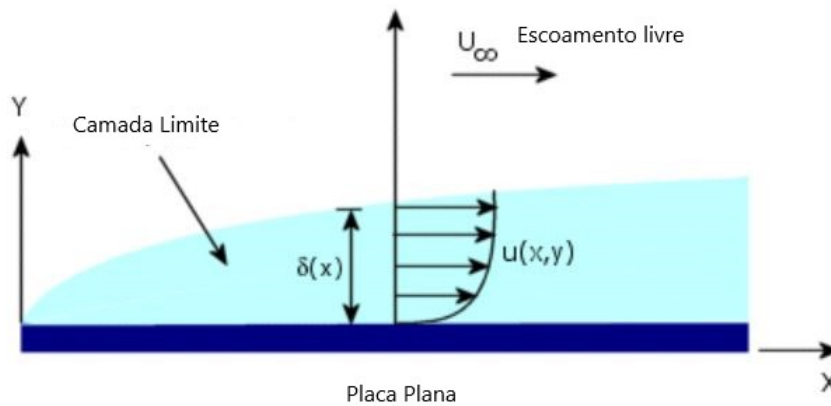


Figura 7: Camada Limite (SOLIDWORKS, 2019)

### 2.1.3 Princípio de Bernoulli

Uma das equações mais fundamentais da mecânica dos fluidos é a equação de Euler. Na sua forma diferencial, ela descreve o comportamento de uma partícula de fluido, relacionando mudança de pressão com mudança de velocidade (Equação 1) (ANDERSON, 2015). Para se chegar na equação de Euler, considera-se o escoamento em regime permanente e desconsidera-se os efeitos da gravidade. Ou seja, ela não leva em conta o peso do fluido.

$$dp = -\rho V dV \quad (1)$$

A Figura 8 ilustra um escoamento de fluido ao redor de um aerofólio. As linhas que indicam o caminho seguido pelos elementos de fluido são chamadas linhas de corrente. Os pontos 1 e 2 são pontos de interesse a serem analisados.

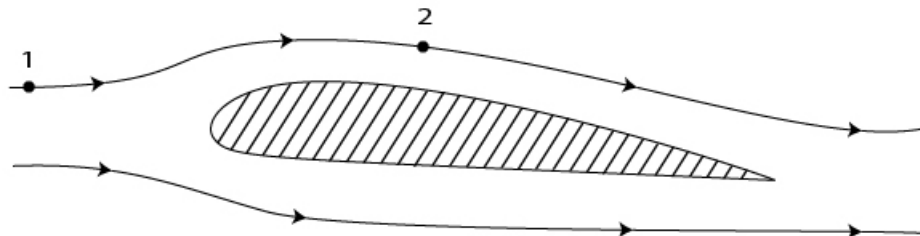


Figura 8: Ilustração de um escoamento ao redor de um aerofólio. (ANDERSON, 2015) - ADAPTADO



Para relacionar pressão e velocidade do ponto 1, com o ponto 2, a Equação 1 deve ser integrada entre eles. Tem-se então:

$$dP + \rho V dV = 0$$

Considerando o fluido como incompressível ( $\rho = \text{constante}$ ), e fazendo a integração entre os pontos, tem-se:

$$\int_{P_1}^{P_2} dP + \rho \int_{V_1}^{V_2} V dV = 0$$

$$P_2 - P_1 + \rho \left( \frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2} \right) = 0$$

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

$$P + \rho \frac{V^2}{2} = \text{constante}. \quad (3)$$

A Equação 3 é chamada de equação de Bernoulli. É importante ressaltar que ela é válida apenas para fluxos incompressíveis, invíscidos e em regime permanente. Ao comparar-se dois pontos distintos do escoamento utilizando a equação de Bernoulli, eles devem estar contidos em uma mesma linha de corrente (ANDERSON, 2015).

Este princípio não pode ser usado para calcular as variáveis de fluxos complexos, como o escoamento através de um Fórmula 1, por exemplo. Nesse caso, há separação de camada limite, áreas de recirculação e efeitos viscosos. No entanto, ele é uma ótima ferramenta para descrever mudanças no campo de pressão e velocidades. Caso a pressão estática  $P$  em uma região do escoamento diminua, por exemplo, a pressão dinâmica  $\rho \frac{V^2}{2}$  na mesma região aumentará (WEINGART, 2015).

### 2.1.4 Número de Reynolds

O Número de Reynolds é um parâmetro adimensional que representa a relação entre forças de inércia e viscosas presentes em um escoamento. Pode-se considerar um escoamento Laminar ou Turbulento a depender do número de Reynolds. Ele depende do comprimento característico da geometria estudada  $c$ , da viscosidade dinâmica  $\mu$ , da velocidade do escoamento  $V$  e da densidade do fluido  $\rho$ , da seguinte forma:  $Re = \frac{\rho V c}{\mu}$  (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2000).

### 2.1.5 Centro de Pressão

Os corpos imersos geram uma perturbação no escoamento de fluido, fazendo com que um campo de pressão seja gerado a sua volta. Um exemplo de campo de pressão ao redor de um aerofólio pode ser visto na Figura 9.

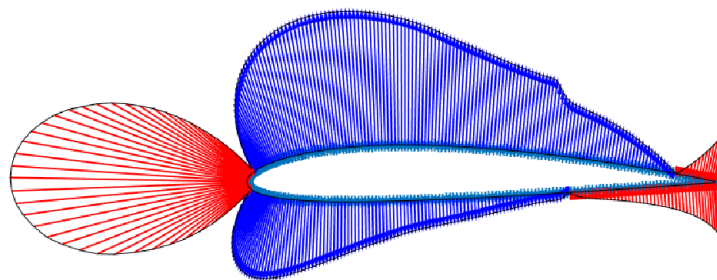


Figura 9: Campo de Pressão ao redor de um Aerofólio (ANAND, 2014)

Para se obter a força aerodinâmica resultante no corpo, deve ser feito um processo de integração da carga distribuída sobre o corpo. O ponto de aplicação da força resultante aerodinâmica é chamado de Centro de Pressão (RODRIGUES, 2013). Como o campo de pressão muda conforme a variação do ângulo de ataque, o centro de pressão também se desloca.

### 2.1.6 Forças Aerodinâmicas

Integrando a distribuição de pressão e de tensão cisalhante sobre a superfície de um corpo, obtemos as forças atuantes nele. A componente paralela ao escoamento é a força de Arrasto, e a componente perpendicular ao escoamento é a força de Sustentação (Figura 10) (ANDERSON, 2010).

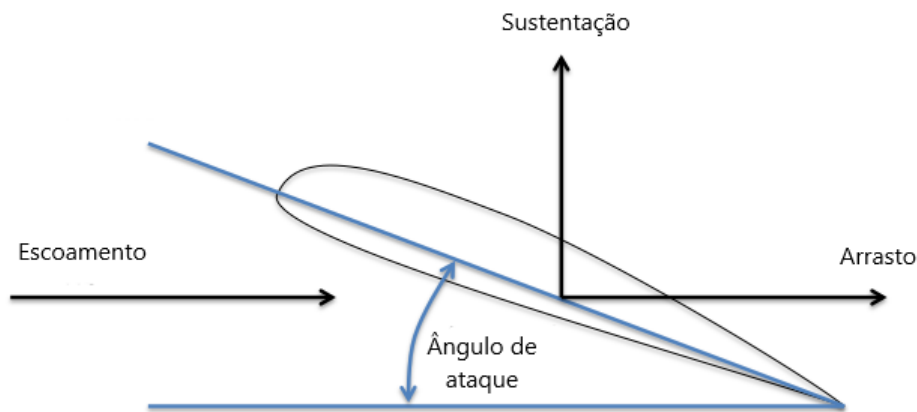


Figura 10: Forças Aerodinâmicas (ANGLE, 2018)- Adaptado

A força de sustentação em um aerofólio, por exemplo, é gerada quando há uma diferença de pressão entre a parte inferior (intradorso) e a parte superior (extradorso) do mesmo. Essa diferença de pressão pode ser gerada por uma curvatura no perfil de asa, ou por uma variação no seu ângulo de ataque, por exemplo (RODRIGUES, 2013).

A força de arrasto ocorre devido à pressão, e também devido a fricção do fluido com a superfície (HUCHO; SOVRAN, 1993). A soma dessas duas componentes nos dá o arrasto total.

As componentes do arrasto nem sempre tem a mesma magnitude. Elas dependem do formato do corpo, como mostra a Figura 11. Comparando o aerofólio com o cilindro menor, por exemplo, é possível observar que, mesmo com tamanhos e formas diferentes, dois corpos podem gerar a mesma quantidade de arrasto total. Outro ponto importante é que corpos iguais, em condições de Reynolds diferentes, apresentam arrasto total diferente. O tipo de geometria também é um fator importante para geração de arrasto em um corpo. A placa plana, mesmo com o comprimento igual ao diâmetro do cilindro  $d$ , consegue gerar mais arrasto total, devido a formação de uma grande região de recirculação após a separação do escoamento.

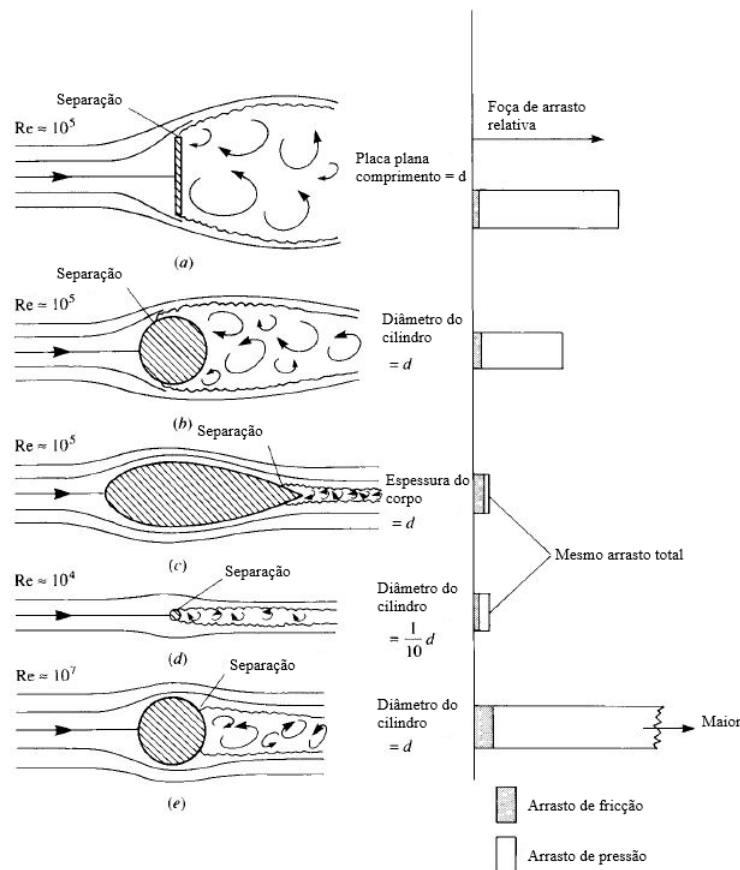


Figura 11: Comparação entre arrasto de pressão e de fricção para vários formatos de corpos (TALAY, 1975)

### 2.1.7 Coeficientes

Os Coeficientes aerodinâmicos são quantidades adimensionais usadas para comparar as forças geradas em corpos diferentes (SMITH, 1978).

Tanto o coeficiente de arrasto, como o de sustentação são obtidos dividindo as respectivas forças pela pressão dinâmica (equações (4) e (5)).

$$C_D = \frac{D}{A \frac{1}{2} \rho v^2} \quad (4)$$

$$C_L = \frac{L}{A \frac{1}{2} \rho v^2} \quad (5)$$

onde  $C_D$  é o coeficiente de arrasto,  $C_L$  é o coeficiente de sustentação,  $D$  é a força de arrasto,  $L$  é a força de sustentação,  $V$  é a velocidade,  $\rho$  é a densidade do fluido e  $A$  é a área. Quanto maior for o coeficiente de sustentação de um corpo, maior será a sua eficiência na geração desta força. O mesmo vale para o coeficiente de arrasto.

## 2.2 AERODINÂMICA NO AUTOMOBILISMO

Como qualquer aplicação de uma ciência, a Aerodinâmica Automobilística tem suas particularidades. Os princípios da Mecânica dos Fluidos são os mesmos, mas a aplicação deles tem objetivos diferentes da Aerodinâmica de Turbinas Eólicas, por exemplo.

Diferentemente dos aviões, onde a aerodinâmica é utilizada para gerar sustentação positiva, nos carros, ela é utilizada, principalmente, para fazer com que eles tenham sustentação negativa, aumentando a carga sobre os pneus, e a sua aderência ao solo. Nesse caso, a sustentação negativa é chamada de *Downforce* (Figura 12).

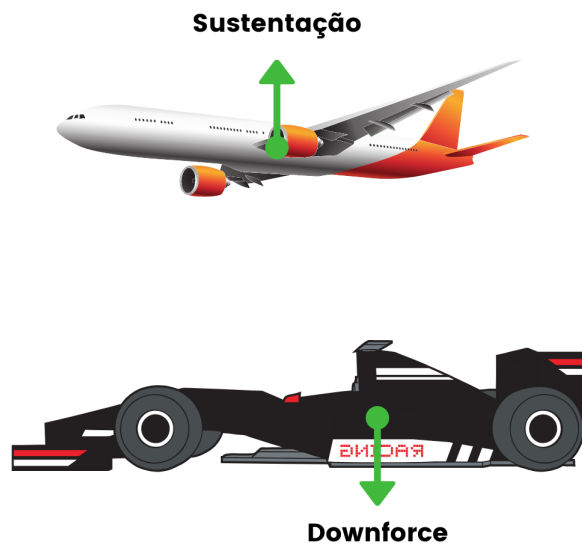


Figura 12: Diferença entre sustentação e *downforce*.

Existem vários tipos de dispositivos capazes de gerar *downforce*, mas os que mais tem impacto sobre as cargas verticais são as asas, e o assoalho do veículo (TOET, 2013). O funcionamento desses dispositivos será detalhado na seção 2.2.1.

### 2.2.1 Dispositivos Geradores de *downforce*

#### 2.2.1.1 Assoalho

A geração de *downforce* no assoalho dos carros de corrida se dá por meio do Efeito Solo. Quando uma superfície curva, como o intradorso de um perfil de asa simétrico se encontra próximo ao chão, o escoamento entre elas passa a se comportar como um Tubo de Venturi. Devido à aceleração do escoamento na região da estrangulamento, há uma

redução na pressão estática local, se tornando menor do que a pressão atmosférica. Como a pressão sobre o perfil é maior do que a pressão sob ele, o *downforce* é gerado (HUCHO; SOVRAN, 1993).

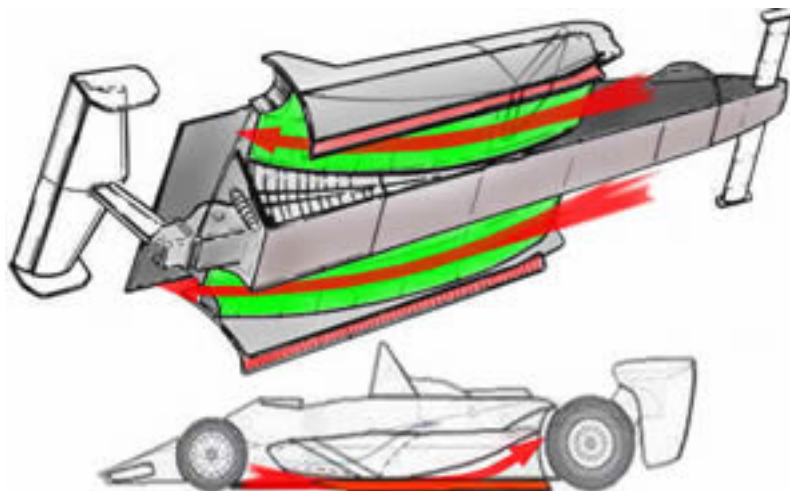


Figura 13: Ilustração do efeito solo (GROUND, 2008)

A grande vantagem do uso do assoalho nos carros de corrida é devido a sua alta eficiência aerodinâmica. Ele é capaz de gerar um elevado *downforce*, causando mínimo arrasto (Figura 17).

#### 2.2.1.2 Asas

Nos carros de corrida, ao contrário dos aviões, as asas são utilizadas de forma invertida. O objetivo é fazer com que elas gerem *downforce* ao invés de gerar sustentação. Nesse caso, a região de alta pressão é formada sobre a asa, e a de baixa pressão, sob ela.

As imagens 14 e 15 mostram exemplos de uso das asas invertidas no automobilismo.



Figura 14: Asa traseira de um carro de Fórmula 1 (TECHNICAL, 2019)



Figura 15: Asa Dianteira de um carro de FSAE (MCGILL, 2015)

Na maioria dos casos, a asa dianteira dos carros de corrida fica próxima ao solo. Isso significa que o Efeito Solo também contribui para a sua geração de *downforce* (KATZ, 1995). A figura 16 mostra a relação entre o módulo do coeficiente de *downforce* ( $CL$ ) e a altura da asa em relação ao chão.

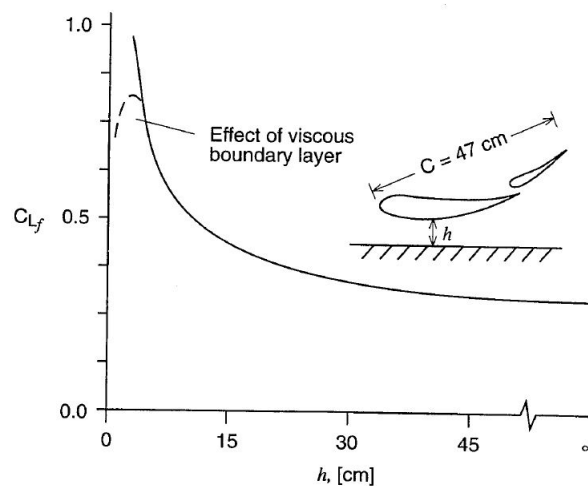


Figura 16: Variação do coeficiente de sustentação com a altura da asa (KATZ, 1995)

### 2.2.1.3 Pacote Aerodinâmico

"Pacote Aerodinâmico" é o nome dado ao conjunto de dispositivos aerodinâmicos em um carro. Cada um deles, se estudados separadamente, apresenta características diferentes. No entanto, quando estão trabalhando em conjunto, há uma interação entre eles, de forma que, não necessariamente, a carga total é o somatório da carga de cada um deles.

A Figura 17 mostra os dispositivos aerodinâmicos presentes em um carro de fórmula 1 e a porcentagem da carga aerodinâmica total cada um deles gera. É possível observar que todos os componentes do carro geram arrasto, mas nem todos geram *downforce*. Os maiores responsáveis pela geração de *downforce* em um carro de corrida, são as asas, o assoalho e o difusor. O assoalho, junto com o difusor, representavam mais de 50% da carga vertical total nos carros de Fórmula 1 de 2009, por exemplo.

Para definir se um dispositivo é eficiente em termos aerodinâmicos, basta calcular a sua razão de *downforce* por arrasto ( $E_{aero} = L/D$ ). Na Figura 17, é possível notar que o conjunto assoalho e difusor é capaz de gerar muito mais carga vertical descendente do que arrasto, logo a sua eficiência aerodinâmica é alta.



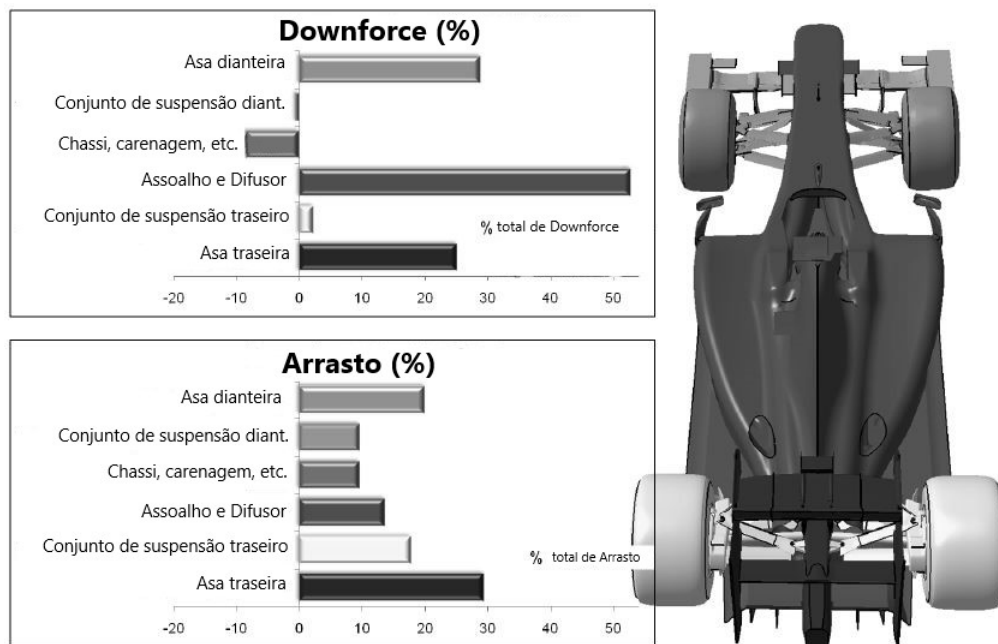


Figura 17: Influência dos dispositivos aerodinâmicos no arrasto e no *downforce* de um Fórmula 1 de 2009 (TOET, 2013)

## 2.3 DINÂMICA VEICULAR

A Dinâmica Veicular é o estudo das respostas do veículo causadas pelas forças natural ou artificialmente (pelo piloto) induzidas sobre ele (SMITH, 1978). Um carro é um sistema complexo e, para extrair sua máxima performance, todos os subsistemas devem trabalhar em harmonia. O estudo da Dinâmica Veicular possibilita a modelagem do funcionamento de todo o sistema como um conjunto, inclusive a relação com o piloto.

A SAE *International* (2008) define o sistema de coordenadas mostrado na Figura 18 como convenção para descrever o comportamento do veículo em pista. O mesmo sistema será adotado neste trabalho para análise dos dados obtidos posteriormente. Os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , representam, respectivamente, os sentidos longitudinal, lateral e vertical, onde  $M_x$ ,  $M_y$  e  $M_z$  são os momentos em torno dos mesmos.

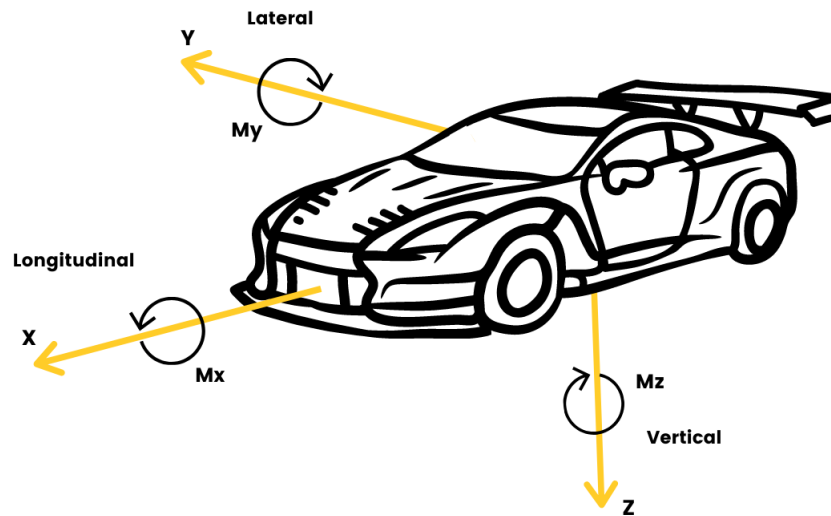


Figura 18: Sistema de coordenadas adotado (SAE International, 2008)

### 2.3.1 O Efeito da Aerodinâmica

A penalidade que o veículo sofre ao gerar *Downforce*, também gerar arrasto por consequência, já que as duas forças são componentes de uma mesma resultante (SEWARD, 2014).

Como o arrasto atua sempre de forma contrária ao movimento do carro, e é proporcional ao quadrado da velocidade, quanto maior a velocidade do veículo, mais ele é "freado" pelo arrasto.

Pode-se estimar a potência absorvida pelo arrasto de acordo com a Equação 6 (SEWARD, 2014).

$$P_{absorvida} = \frac{C_D A v^3}{1,225} \quad (6)$$

A Figura 19 mostra a potência absorvida em função da velocidade para dois carros de corrida diferentes. A potência é medida em *bhp* e a velocidade em *mhp*. Apesar de serem unidades de medidas não convencionais, as curvas traçadas ilustram o efeito do arrasto no desempenho do veículo.

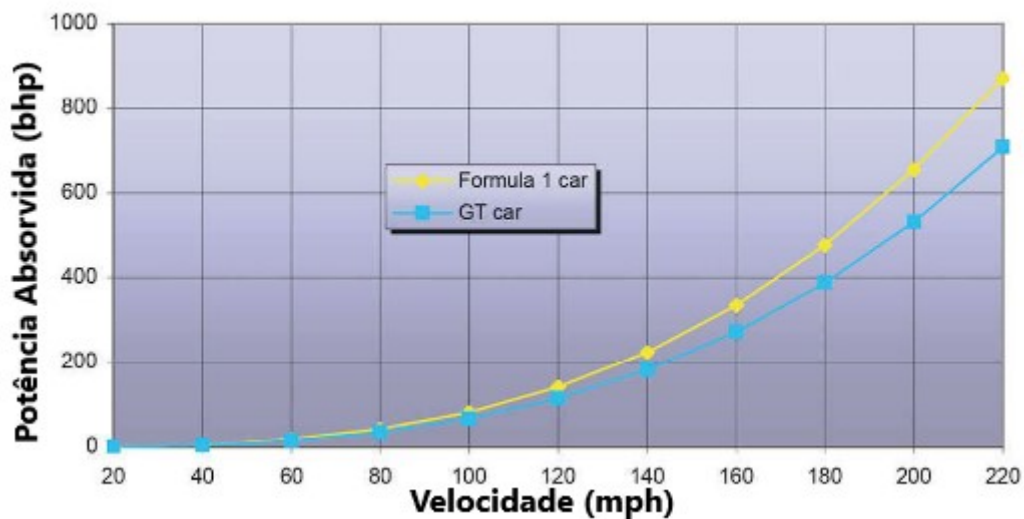


Figura 19: Potência absorvida pelo arrasto (MCBEATH, 2017) - ADAPTADO

Analisando as curvas (Figura 19), é possível notar que o carro de Fórmula 1 apresenta mais arrasto do que o veículo do tipo GT, pois para uma mesma velocidade, o veículo do tipo fórmula tem um valor de potência absorvida maior. A 140 *mph*, verifica-se que a potência absorvida no carro de fórmula 1 ultrapassa os 200 *bhp*, por exemplo.

### 2.3.1.1 Efeito na Aceleração

O *downforce* tem pouco efeito sobre a aceleração do veículo. Principalmente para veículos de baixa potência, que geralmente tem um pico de tração antes de atingir os 100 km/h. Nessa velocidade, os efeitos da carga vertical sobre os pneus ainda são muito pequenos (SEWARD, 2014).

### 2.3.1.2 Efeito na frenagem

O efeito da carga aerodinâmica vertical na frenagem é significativo. A Figura 20 mostra a distância de frenagem em função da velocidade inicial do carro, para diferentes coeficientes de sustentação. É possível observar que, quanto maior o módulo do coeficiente de sustentação, mais perto da curva é possível frear. Isso faz com que o carro perca menos tempo em desaceleração e retome a aceleração muito mais rápido.

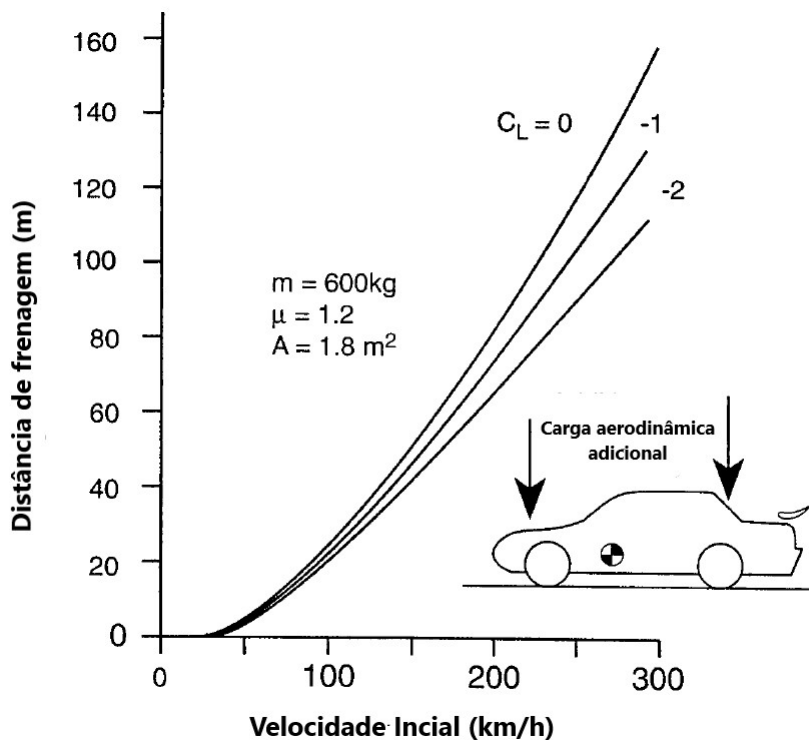


Figura 20: Efeito do *downforce* na distância de frenagem em função da velocidade inicial (KATZ, 1995) - ADAPTADO

### 2.3.1.3 Efeito na Capacidade de Curva

Ao fazer uma curva, a inércia faz com que o carro tenha uma tendência de sair pela tangente. O que faz com que isso não aconteça é a força de atrito dos pneus com o solo. A relação entre a carga vertical sobre os pneus e a força de atrito é descrita pela Equação 7.

$$F_y = \mu F_z \quad (7)$$

Onde,  $F_y$  é a força de atrito,  $\mu$  é o coeficiente de atrito e  $F_z$  é a carga vertical sobre os pneus.

Naturalmente os pneus de um carro já são carregados pelo próprio peso, mas quando adiciona-se mais carga por meio da geração de *downforce*, a sua capacidade de fazer curva aumenta, como pode ser visto na Figura 21.

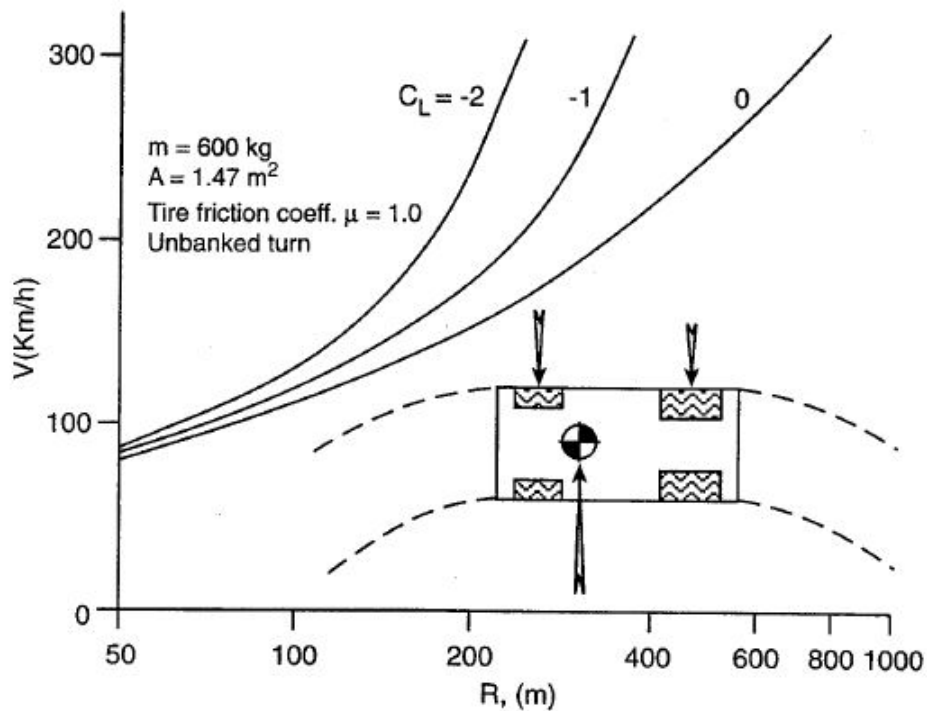


Figura 21: Velocidade em função do raio de curva para diferentes coeficientes de *downforce* (KATZ, 1995)

O que pode ser concluído da Figura 21 é que para um mesmo raio de curva, quanto maior o *downforce*, maior é a velocidade que o veículo consegue contorná-la.

#### 2.3.1.4 Efeito nas acelerações

O diagrama G-G é uma ferramenta muito utilizada para visualizar a interação entre curva, frenagem e aceleração. Ele também é chamado de Círculo de fricção, por descrever os limites de aderência dos pneus em todas as direções (SEWARD, 2014).

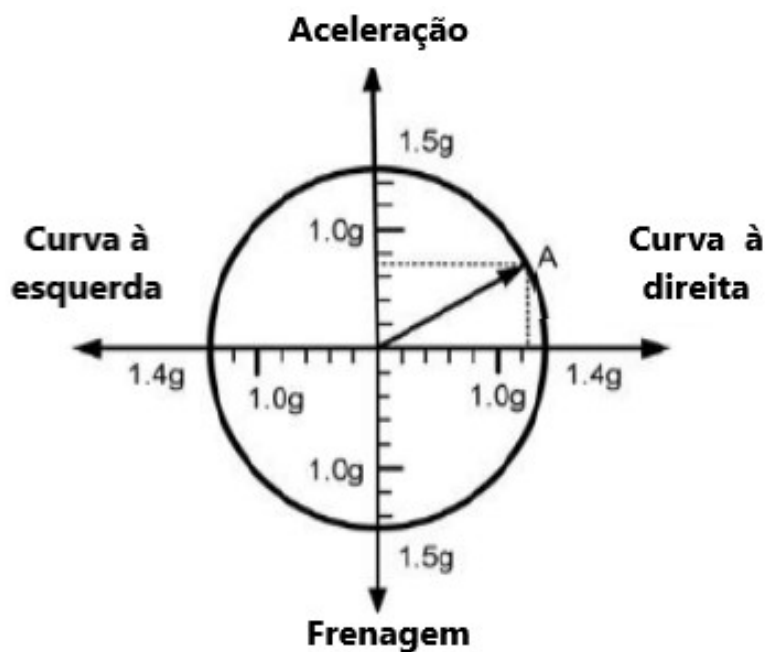


Figura 22: Diagrama G-G para pneu individual (SEWARD, 2014)

O diagrama da Figura 22 representa o comportamento de um único pneu. Neste caso, ele é capaz de suportar até 1.5 g em aceleração ou frenagem, e pouco menos de 1.4 g em curva. Caso as acelerações ultrapassem esses limites, o pneu perde a aderência com o solo e tende a deslizar.

No caso de um veículo de quatro rodas, o círculo de atrito se parece mais com a Figura 23. A aceleração em tração é naturalmente menor do que a aceleração em frenagem (SEWARD, 2014).

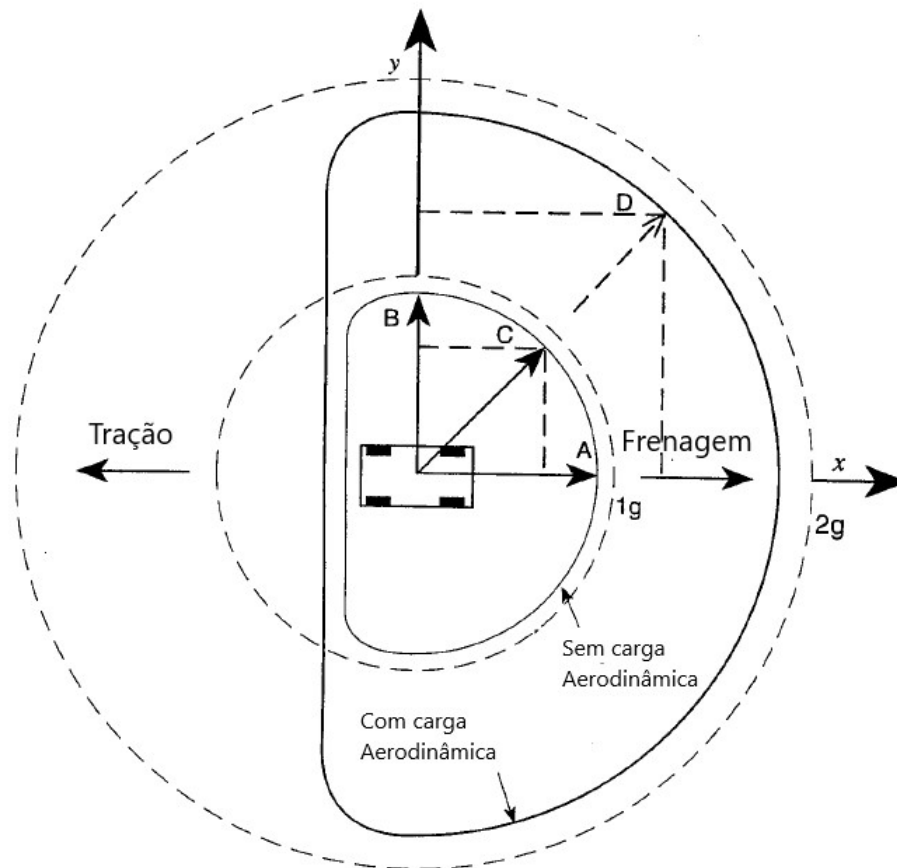


Figura 23: Efeito do *downforce* no diagrama gg (KATZ, 1995) - ADAPTADO

Com o acréscimo de *downforce*, os limites do círculo de tração se tornam maiores, permitindo acelerações mais elevadas em curvas e em frenagem.

## 2.4 Métodos Experimentais para Obtenção de *downforce*

### 2.4.1 Estimativa Através do Coeficiente de *downforce*

As forças aerodinâmicas dependem da densidade  $\rho$  do fluido, da velocidade a montante  $V$  e do tamanho, forma e orientação do corpo (CENGEL; CIMBALA, 2015). Para corpos muito complexos como carros, não existe uma solução analítica para o cálculo das forças. Trabalha-se então, com números adimensionais apropriados que representam as características de forças do corpo. Esses números são os coeficientes de arrasto e sustentação (neste caso, *downforce*), definidos na Subseção 2.1.7.

O *downforce* de um carro, pode ser obtido direta ou indiretamente, a depender

do conhecimento do coeficiente de *downforce* ( $C_L$ ). Caso o coeficiente seja conhecido, pode-se realizar a medição da pressão dinâmica ( $q = \frac{1}{2}\rho V^2$ ), e fazer uma estimativa da força gerada no veículo através da Equação 5 (SEGERS, 2014).

A pressão dinâmica pode ser medida utilizando-se um tubo de Pitot semelhante ao mostrado na Figura 24.

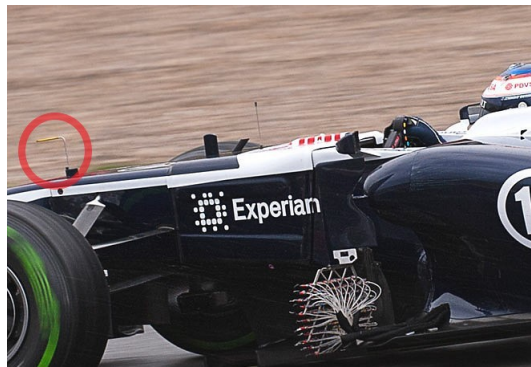


Figura 24: Tubo de Pitot instalado em um carro de Fórmula 1 (F1 TECHNICAL, 2013) - ADAPTADO

A forma mais precisa de obtenção do  $C_L$  é através de medições em túnel de vento, uma vez que, neste caso, há um maior controle sobre as variáveis de teste, e em princípio, a influência das condições atmosféricas externas é baixa (KATZ, 1995). Neste tipo de teste, as cargas geradas no veículo são medidas por meio de balanças. Conhecendo-se então, a densidade e a velocidade do fluido, o coeficiente de  $C_L$  pode ser estimado.

A Figura 25 mostra um modelo em escala de um carro de Fórmula SAE sendo testado em túnel de vento.



Figura 25: Teste em Túnel de Vento com modelo em escala (KONELEK, 2016)



### 2.4.2 Cálculo Através das Alturas de Passeio

As Alturas de Passeio (ou *Ride Heights*) são as distâncias entre a pista e o assoalho do carro, medidas sob o eixo de simetria longitudinal, em pontos específicos, como pode ser visto na Figura 26.



Figura 26: Posição das alturas de passeio (PETRIC, 2020) - ADAPTADO

Sabe-se que o sistema de suspensão do veículo apresenta comportamento elástico quando sujeito à cargas e/ou excitações da pista. As molas absorvem a energia, enquanto que os amortecedores têm a função de dissipá-la. Logo, quando sobre o veículo é aplicada um carregamento vertical de cima para baixo, as suas alturas de passeio variam. O *downforce* gerado é calculado a partir das rigidezes do sistema de suspensão e a variação das alturas de passeio.

As alturas de passeio do veículo podem ser medidas diretamente usando transdutores de deslocamento laser, que medem diretamente a distância do veículo em relação ao solo ou indiretamente através de transdutores de deslocamentos potenciométricos instalados no sistema de suspensão. A Figura 27 mostra sensores deste tipo instalados em carros de corrida.

A Figura 27a mostra um potenciômetro linear instalado junto a um dos amortecedores de um carro. Este tipo de sensor é instalado nos mesmos pontos de fixação do amortecedor, de forma que os dois componentes se desloquem juntos.

Já a Figura 27b mostra um transdutor de deslocamento a laser instalado em um carro de corrida. Nesse caso, o sensor emite e recebe de volta uma luz direcionada, e através do ângulo de deflexão, calcula a sua distância em relação ao solo.

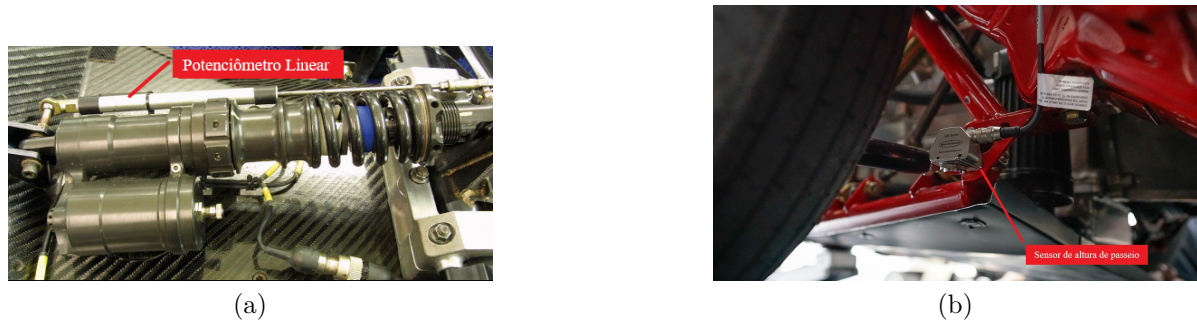


Figura 27: Sensores para medição de altura de passeio. (a) Potenciômetro linear (MC-BEATH, 2017). (b) Sensor de altura de passeio (GALIMI, 2018)

Uma diferença importante entre os dois tipos de medição, é que o potenciômetro linear não permite medir a deformação dos pneus devido à carga, resultado então em um *downforce* menor do que o aquele obtido através da medição dos transdutores de deslocamento à laser (SEGERS, 2014). Caso valores de deformação do pneu com a carga sejam conhecidos, pode-se incluir nos cálculos das forças, para que se aproximem daquelas obtidas por medição direta.

#### 2.4.2.1 Medição Direta - Cálculo das Forças e Alturas de Passeio

A Figura 28 mostra os parâmetros necessários para o cálculo das alturas de passeio do carro.

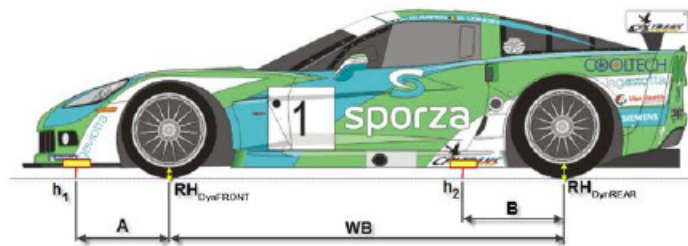


Figura 28: Parâmetros para cálculo das alturas de passeio (SEGERS, 2014)

As alturas de passeio dianteira e traseira podem ser calculadas a partir das Equações 8 e 9, respectivamente.

$$RH_{dynFRONT} = \frac{A(h_2 - h_1)}{WB + A - B} + h_1 \quad (8)$$

$$RH_{dynREAR} = \frac{(WB + A)(h_2 - h_1)}{WB + A - B} + h_1 \quad (9)$$

onde  $h_1$  e  $h_2$  são os sinais dos transdutores de deslocamento a laser,  $A$  e  $B$  são as distâncias entre a posição dos sensores e o centro das rodas,  $WB$  é a distância entre os centros das rodas do carro (entre eixos),  $RH_{dynFRONT}$  e  $RH_{dynREAR}$  são as alturas de passeio dinâmicas frontal e traseira, respectivamente.

A partir das alturas de passeio, pode-se obter as cargas em cada eixo usando as Equações 10 e 11.

$$L_F = 2K_{rrF}(RH_{Fstatic} - RH_F) + \frac{Wa_x h_{cg}}{l} \quad (10)$$

$$L_R = 2K_{rrR}(RH_{Rstatic} - RH_R) - \frac{Wa_x h_{cg}}{l} \quad (11)$$

onde,  $K_{rr}$  é a rigidez total de um quarto de carro em cada eixo analisado,  $W$  é o peso do carro,  $A_x$  é a aceleração longitudinal,  $l$  é o entre eixos e  $h_{cg}$  é a altura do centro de gravidade medida em relação ao solo.

#### 2.4.2.2 Medição Indireta

Para as medições com os potenciômetros lineares, alturas de passeio dinâmicas, dianteira e traseira, podem ser calculadas a partir das Equações 12 e 13 (SEGERS, 2014).

$$RH_F = RH_{Fstatic} - \frac{\chi_{FL} + \chi_{FR}}{2IR_F} \quad (12)$$

$$RH_R = RH_{Rstatic} - \frac{\chi_{RL} + \chi_{RR}}{2IR_R} \quad (13)$$

onde  $RH_{static}$  representa a altura de passeio (*Ride Height*) na condição estática,  $\chi$  representa o deslocamento dos amortecedores, e  $IR$  a razão de instalação da suspensão. Os subscritos  $F$ ,  $R$ ,  $L$  e  $R$ , significam Dianteira (*Frontal*), Traseira (*Rear*), Esquerda (*Left*) e Direita (*Right*), respectivamente.  $\chi_{RL}$ , por exemplo, é o deslocamento do amortecedor traseiro esquerdo, medido pelo potenciômetro linear.

As forças podem ser calculadas pelos dados de deslocamento dos amortecedores usando as Equações 14 e 15.

$$L_F = \frac{K_{sF}}{IR_F}(\chi_{FL} + \chi_{FR}) + \frac{Wa_x h_{cg}}{l} \quad (14)$$

$$L_R = \frac{K_{sR}}{IR_R}(\chi_{RL} + \chi_{RR}) - \frac{Wa_x h_{cg}}{l} \quad (15)$$

onde  $L_F$  e  $L_R$  são as forças nos eixos dianteiro e traseiro, respectivamente,  $K_s$  é a rigidez da mola correspondente,  $W$  é o peso do carro,  $A_x$  é a aceleração longitudinal,  $l$  é o entre eixos e  $h_{cg}$  é a altura do centro de gravidade medida em relação ao solo.  $l$  é a distância entre eixos do carro, definida como distância entre os centros das rodas dianteira e traseira.

Nos carro dos tipo fórmula, como o AF20, grande parte da variação de altura devido às cargas, são provenientes dos pneus, já que, no geral, o tipo de suspensão usado apresenta elevada rigidez (SEGERS, 2014).

As equações para o cálculo das alturas de passeio dinâmicas, que consideram o raio dinâmico dos pneus são (SEGERS, 2014):

$$RH_F = RH_{F_{static}} - \frac{r_{rollingLF} + r_{rollingRF}}{2} - r_{staticF} \quad (16)$$

$$RH_R = RH_{R_{static}} - \frac{r_{rollingLR} + r_{rollingRR}}{2} - r_{staticR} \quad (17)$$

onde,  $r_{rolling}$  representa o raio dinâmico dos pneus e  $r_{static}$  é o raio do pneu na condição estática.

#### 2.4.2.3 Cálculo do Balanço Aerodinâmico e do Coeficiente de *downforce*

Conhecidas as cargas em cada eixo, o coeficiente de *downforce* e o balanço aerodinâmico podem ser obtidos pelas Equações 18 e 19, respectivamente.

$$C_{LA} = \frac{2(L_F + L_R)}{\rho v^2} \quad (18)$$

$$\%L_F = \frac{L_F}{L_F + L_R} \quad (19)$$

### 2.4.3 Medição Direta por Célula de Carga

Outra forma de obter o *downforce*, é instalando uma célula de carga no tubo de alavanca (*Push Rod*) da suspensão, fazendo com que as células de carga meçam diretamente a força atuante. Um ponto importante a se considerar no uso deste método, é que a força aerodinâmica gerada pelas próprias rodas não é computada. (MCBEATH, 2017).

A Figura 29 mostra um exemplo de célula de carga instalada no tubo de alavanca da suspensão de um carro de corrida.



Figura 29: Célula de carga instalada no tubo de alavanca da suspensão (MCBEATH, 2017)

## CAPITULO 3

### METODOLOGIA

Os dois métodos de cálculo do *downforce* através das alturas de passeio foram escolhidos para realização deste trabalho. A escolha se deu por três motivos:

- Desconhecimento do  $C_L$  real do carro;
- Disponibilidade dos sensores necessários;
- Verificação da influência da deflexão dos pneus nas medições.

O procedimento experimental para coleta dos dados em pista é descrito na Seção 3.2

### 3.1 Aparato Experimental

#### 3.1.1 Transdutor de Deslocamento à Laser

O Transdutor de Deslocamento à Laser utilizado, foi o modelo OADM 12I6430/S35A da Baumer (Figura 30), cedido pelo Laboratório de Fadiga e Integridade Estrutural de Cabos Condutores de Energia (Labcabos) da Universidade de Brasília (UnB). As principais especificações do equipamento são destacadas na Tabela ??.



Figura 30: Transdutor de deslocamento à laser, modelo OADM 12I6430/S35A. (BAUMER, 2017)

Tabela 1: Especificações técnicas do transdutor de deslocamento laser.

<b>Faixa de leitura</b>	16 a 120mm
<b>Resolução</b>	0,002 a 0,12
<b>Alimentação</b>	12 a 28 VDC
<b>Tensão de saída</b>	0 a 10 V

Foram instalados três transdutores laser. Um na traseira e os outros dois na dianteira, de acordo com recomendações de Segers (2014). Foram fixados diretamente ao chassi do veículo, como pode ser visto na Figura 31, de forma de os *Ride Heights* dianteiro e traseiro pudessem ser calculados a partir das suas medições.



Figura 31: Sensores laser instalados.

### 3.1.2 Potenciômetro Linear

O Potenciômetro linear utilizado, foi o modelo LT-M-0050-S-0000 X 000-X-0-0 da Gefran, cedido pelo Laboratório de Estruturas do Departamento de Engenharia Civil. A Tabela 2 mostra as principais especificações do equipamento.



Figura 32: Potenciômetro linear - modelo LT. (GEFRAN, 2015)

Tabela 2: Especificações Técnicas do potenciômetro Linear

<b>Faixa de leitura</b>	0 a 50 mm
<b>Resolução</b>	infinita
<b>Tensão máxima</b>	60 V

Foram instalados quatro potenciômetros, sendo em cada um dos amortecedores do carro, ambos conectados à central responsável por controlar o motor do veículo, a FT600. Os transdutores foram dispostos de acordo com a Figura 33. Um suporte foi desenvolvido utilizando chapa de aço de modo que o transdutor trabalhe em paralelo com o amortecedor, permitindo a medição dos deslocamentos.



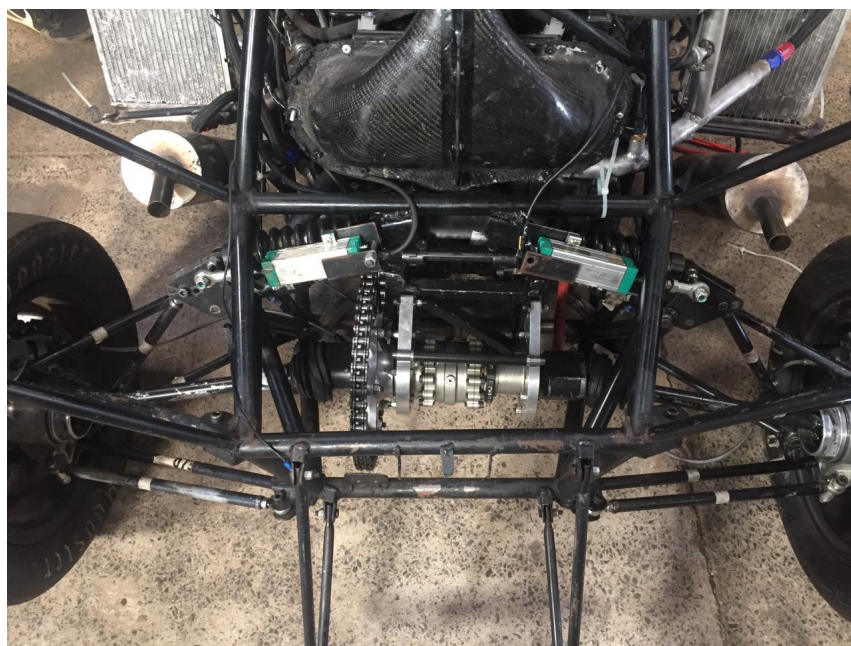


Figura 33: Potenciômetros instalados na suspensão traseira

### 3.1.3 AiM EVO4S

O carro da equipe Apuama Racing conta com uma central de aquisição de dados da marca AiM, o EVO4S, como pode ser visto na Figura 34. O equipamento conta com cinco canais analógicos, dois canais de velocidade e um de RPM. Existem ainda, outros cinco canais digitais disponíveis para conexão de outros sensores. Por meio dessa central, foram coletados dados de aceleração, velocidade, GPS e de deslocamento vertical do veículo, através dos transdutores *Laser*. Além disso, as duas unidades de aquisição foram sincronizadas através de protocolo CAN de modo a permitir a interpretação das medições.



Figura 34: AiM EVO4S. (Fonte: Motorsport Store)

### 3.1.4 FuelTech FT600

A central que controla a injeção eletrônica do motor é a FT600, fabricada pela *FuelTech*, Figura 35. Além de fazer o controle do motor, o equipamento possui um *Data-logger* interno e canais de entradas analógicas para aquisição dos dados medidos através de sensores. Os Transdutores de Deslocamento Linear foram conectados diretamente na FT600.



Figura 35: FT600. (Fonte: FuelTech)

### 3.1.5 Medida de Condições Climáticas

A Figura 36 mostra os equipamentos utilizados para registrar as condições de tempo durante o teste. O anemômetro portátil SPIN-AN-836, da marca *Equitherm*, é capaz de medir a velocidade do vento e a temperatura ambiente, enquanto que o termômetro infravermelho IR01D, da marca *Mestek*, consegue medir: temperatura ambiente, umidade relativa e temperatura de superfícies.

Dados de pressão ambiente foram coletados através do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).



(a) Anemômetro portátil.



(b) Termômetro infravermelho. (Fonte: Zoom.com)

Figura 36: Equipamentos utilizados para medição das condições de tempo durante o teste.

Tabela 3: Especificações técnicas do anemômetro.

<b>Faixa de Leitura</b>	0 a 45 m/s
<b>Resolução</b>	0,1 m/s

Tabela 4: Especificações técnicas do termômetro infravermelho.

<b>Faixa de Leitura (temperatura no foco)</b>	-50 a 80 °C
<b>Faixa de Leitura (temperatura ambiente)</b>	-10 a 60 °C
<b>Resolução</b>	0,1 m/s

### 3.1.6 Calibração do Transdutor de Deslocamento à Laser

O procedimento para calibração dos transdutores de deslocamento laser está mostrado na Figura 37. A calibração de cada um dos transdutores foi realizada através de regressão linear, relacionando-se os deslocamentos medidos com a tensão elétrica registrada pelo conversor A/D do AiM EVO4S. Para isso, o transdutor a laser foi fixado em uma base magnética e os deslocamentos foram introduzidos por um micrômetro. A Figura 38 mostra a curva de calibração obtida para um dos transdutores.

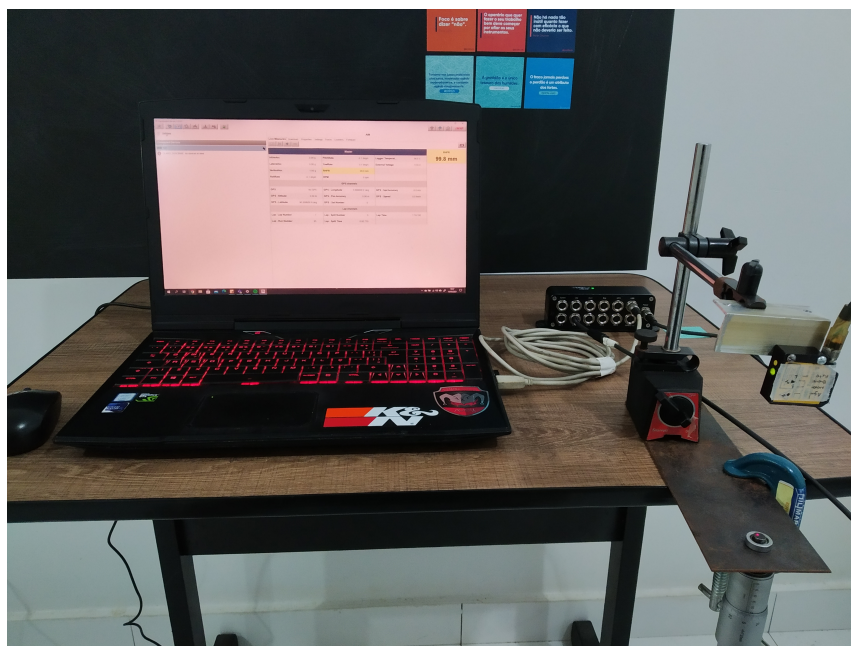


Figura 37: Procedimento de calibração do transdutor de deslocamento laser.

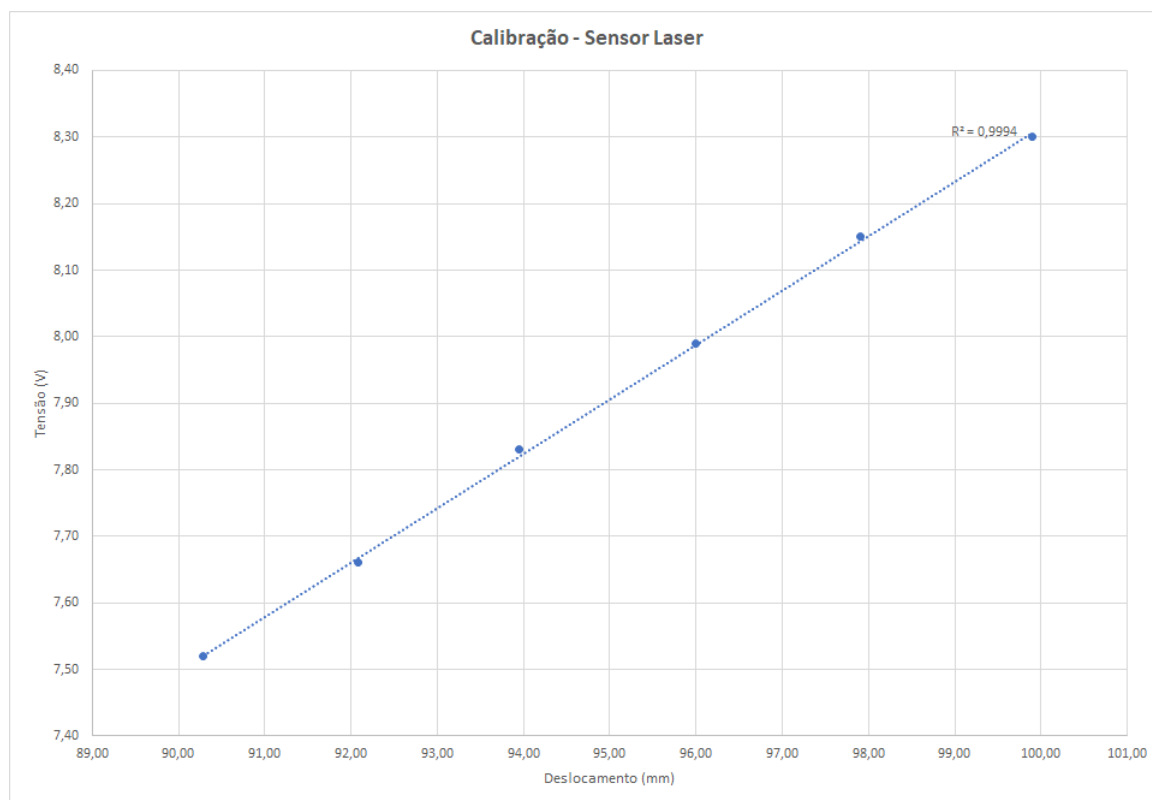


Figura 38: Curva de calibração do transdutor de deslocamento laser.

### 3.1.7 Calibração Potenciômetro Linear

O potenciômetro linear tem como princípio de funcionamento a variação de sua resistência interna em função do deslocamento da haste móvel. Portanto, a obtenção da curva de calibração foi realizada definindo-se dois pontos da curva de calibração. O primeiro ponto correspondente a haste toda fechada que corresponde a situação a um sinal de tensão nula lida no conversor A/D. Por sua vez, o segundo ponto corresponde a situação onde a haste é toda distendida (curso máximo do transdutor), onde a tensão lida no conversor A/D corresponde a tensão de excitação do transdutor. Ao final da obtenção da curva de calibração do transdutor, a verificação da calibração foi feita com o auxílio de um paquímetro, Figura 39. Na Figura 40 podem ser observadas as curvas de calibração dos quatro transdutores utilizados neste trabalho.

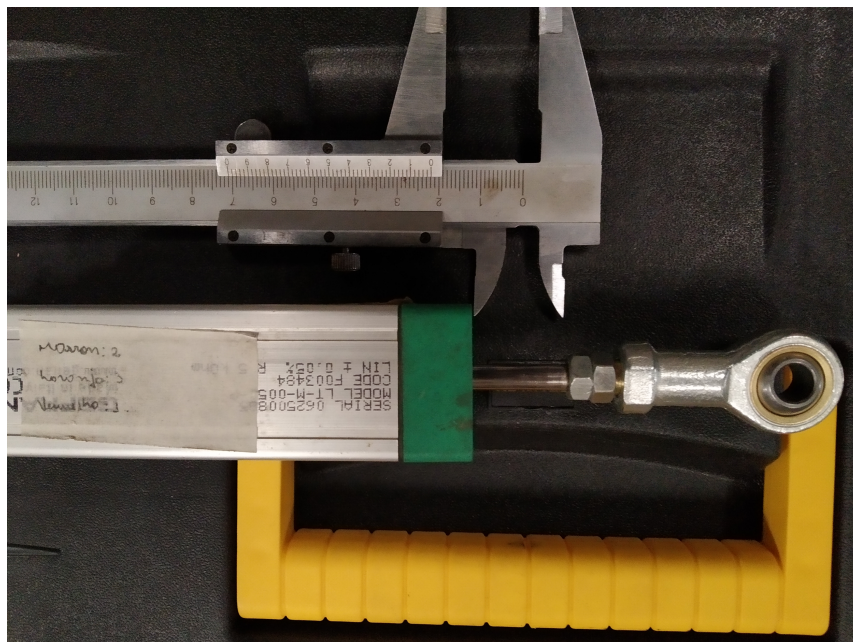


Figura 39: Procedimento de calibração do potenciômetro linear.

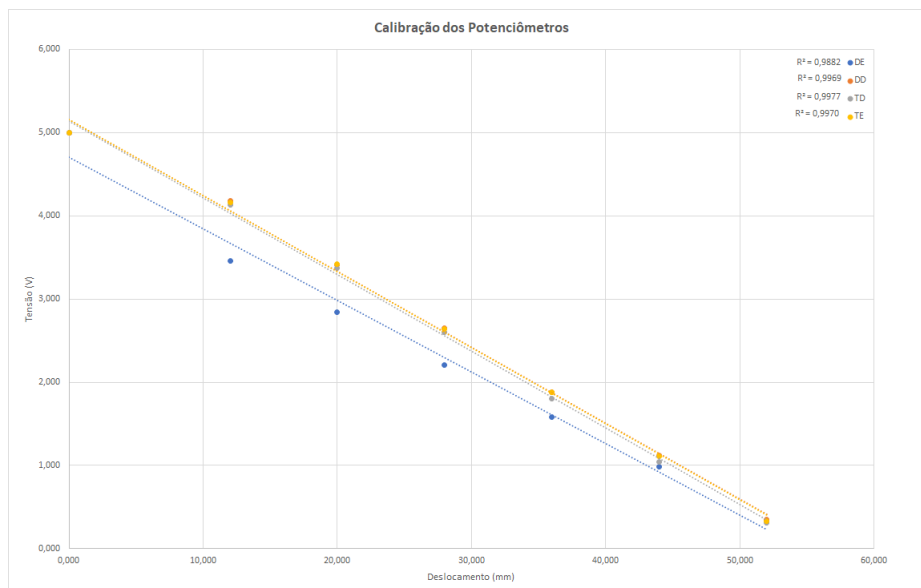


Figura 40: Curva de calibração do potenciômetro linear.

### 3.1.8 Montagem

A ilustração da Figura 41 é uma representação de todos os sensores e centrais de aquisição de dados que foram utilizados para a coleta dos dados. As linhas roxas representam as conexões dos potenciômetros lineares com a FT600, já as linhas verdes representam a ligação dos sensores laser ao EVO4S. A sincronização entre as centrais é representada pela linha preta.

A definição da montagem do sistema usando duas centrais, se deu pelo fato de que a FT600 não gera a tensão necessária para alimentação dos sensores laser. Logo, foi preciso conectá-los ao EVO4S, e fazer a conexão entre ele e a FT600 por meio da rede CAN. Além disso, não foi possível conectar todos os sensores apenas ao EVO4S, uma vez que existem apenas cinco canais disponíveis.

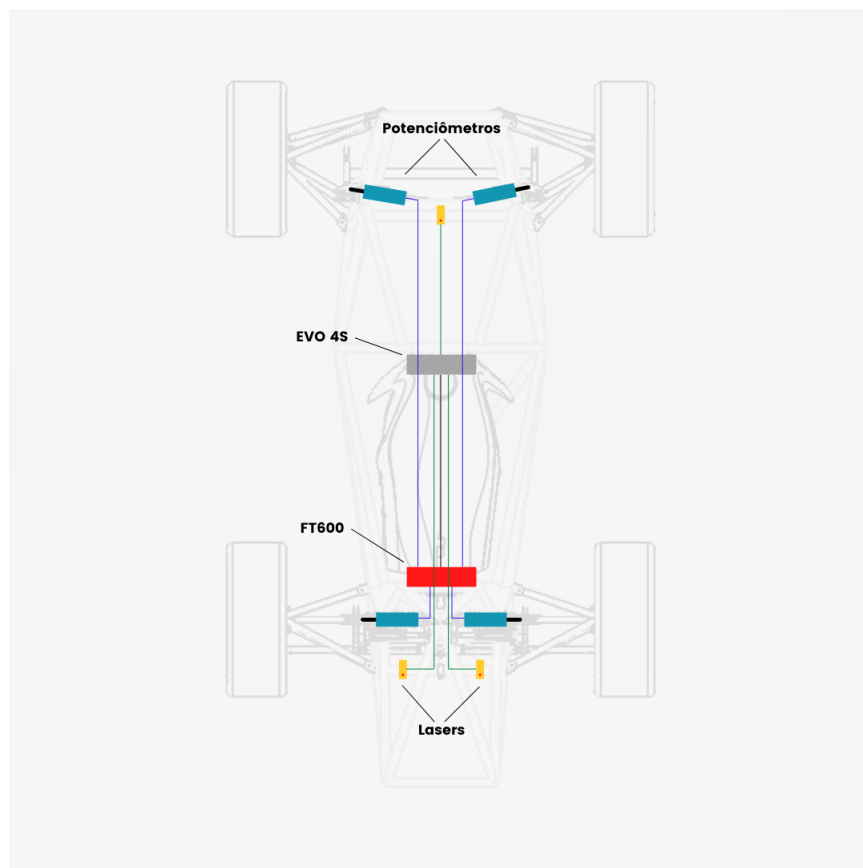


Figura 41: Ilustração das conexões entre sensores e centrais.

## 3.2 Procedimento Experimental

### 3.2.1 Local de Testes

Todos os testes foram realizados no Autódromo Internacional Nelson Piquet, Figura 42, no dia 27/04/2021, entre 13h e 17h. Apesar do Autódromo estar fechado ao público há algum tempo, foi escolhido como pista de teste pois as retas dos kartódromos de Brasília não apresentam comprimento suficiente para a realização do teste. Além disso, os trechos que ainda permanecem conservados, possuem asfalto de melhor qualidade.





Figura 42: Autódromo Internacional Nelson Piquet. (Fonte: Google Earth)

Apesar de ter retas longas, a pista estava em processo de processo de manutenção, sem condições técnicas para a realização dos testes. Foi escolhido então, o maior trecho, cujo asfalto ainda permanece conservado, Figura 43. O trecho escolhido consiste em uma reta de, aproximadamente 185 metros, e uma curva utilizada para retornar para a mesma reta. Os pontos "A" e "B" serão usados como referência para indicar a direção das passadas.



Figura 43: Trecho escolhido para o teste. (Fonte: Google Earth)

### 3.2.2 Taxa de Amostragem

A taxa de amostragem para realização dos testes foi escolhida com base nas taxas disponíveis na configuração das centrais de aquisição de dados (de 1 a 1000  $Hz$ ). Como a ideia é analisar um intervalo no qual a velocidade é constante, a frequência não precisa ser tão elevada. No entanto, como os dados poderiam ser aproveitados pela equipe para observação de comportamentos dinâmicos, foi escolhida a frequência de 200  $Hz$ , a qual mostrou-se satisfatória para medir as séries temporais de deslocamentos nos pré-testes realizados.

### 3.2.3 Pré-teste

A primeira etapa do experimento consiste em um reconhecimento da pista pelo piloto, a preparação do carro, e uma verificação inicial do funcionamento dos sensores e se o carro está se comportando como esperado. De acordo com os seguintes passos:

- Reconhecimento da pista pelo piloto;
- Adaptação do piloto ao procedimento a ser realizado;
- Aquecimento do motor, diferencial e pneus;
- Teste do funcionamento dos sensores;
- Verificação do comportamento dinâmico do carro;
- Medições iniciais das condições de tempo.

A Figura 44 mostra um típico conjunto de gráficos que são gerados para análise de performance de carros de corrida. As séries temporais foram obtidas através da ferramenta *Race Studio Analysis*, do software *Race Studio 3*, da empresa AiM. O Eixo *X* indica o tempo transcorrido em segundos, enquanto que o eixo *Y* corresponde a grandeza medida (aceleração, deslocamento, etc). As curvas indicam não só o bom funcionamento dos sensores, como o comportamento dinâmico esperado. É possível observar que quando o carro acelera, há naturalmente uma transferência de carga para a traseira, resultando em um aumento da altura da dianteira, e uma redução na altura da traseira. Já em frenagem, a carga é transferida para o eixo dianteiro, causando um aumento na altura de passeio traseira, e uma redução no dianteiro.

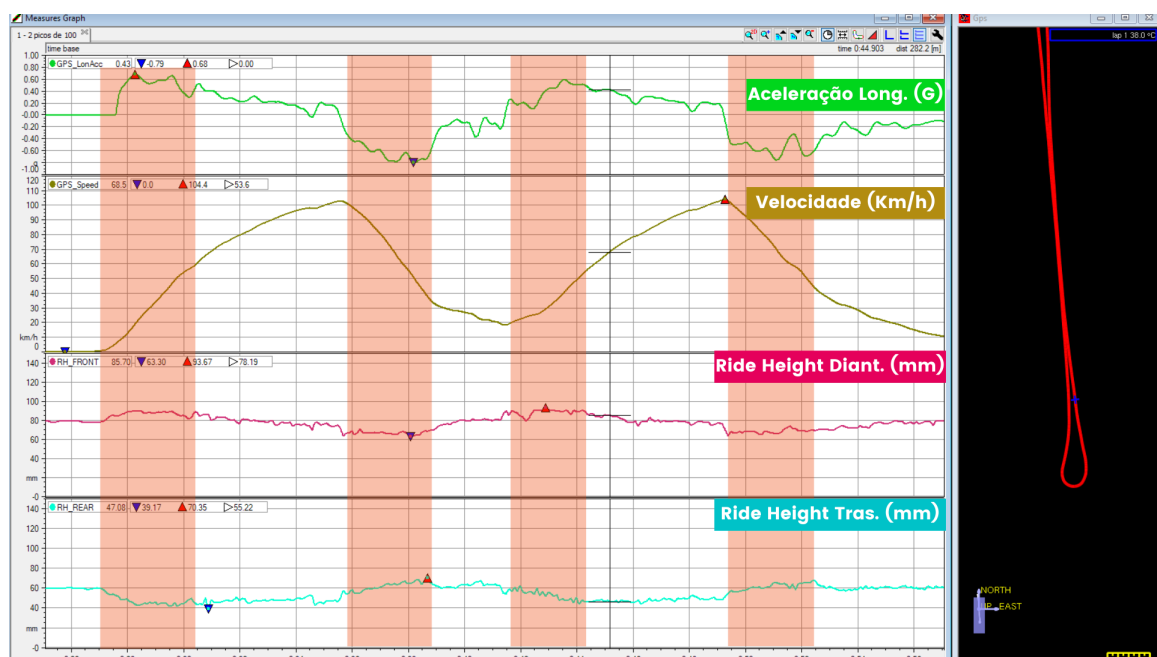


Figura 44: Aquecimento pré-teste.

Na verificação do funcionamento dos potenciômetros no pré-teste, foi usado o *FT-manager*, ferramenta de análise de dados da *FuelTech*. As setas em azul indicam, por exemplo, o instante de arrancada, quando os amortecedores traseiros comprimem, e os dianteiros são distendidos, resultado da transferência de carga longitudinal.

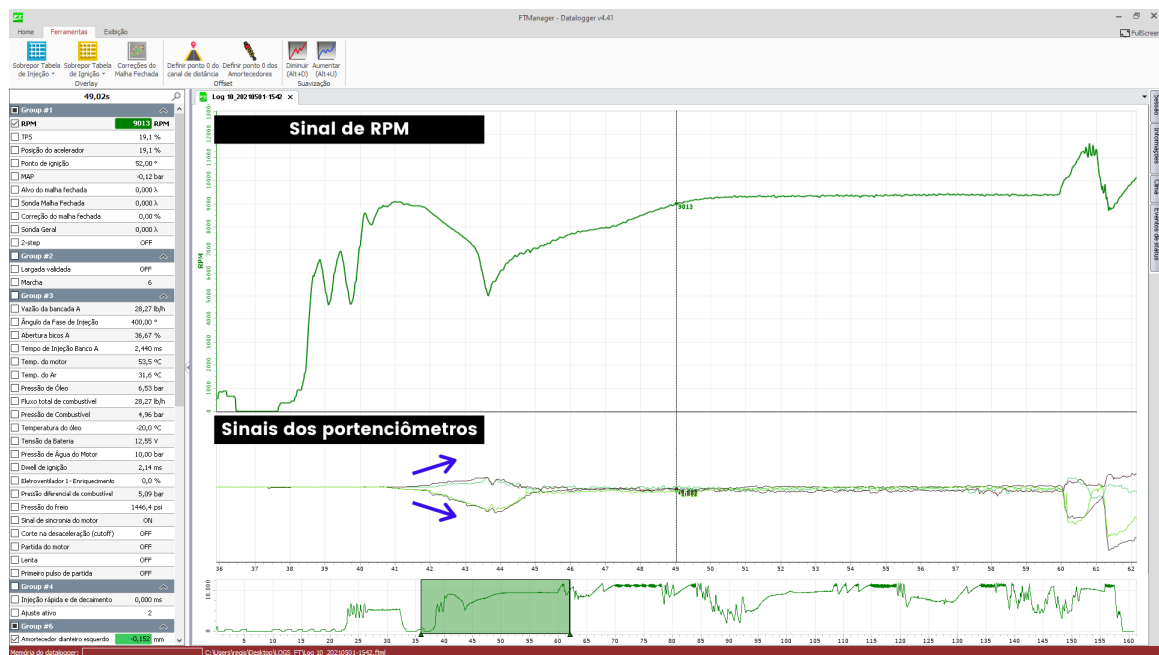
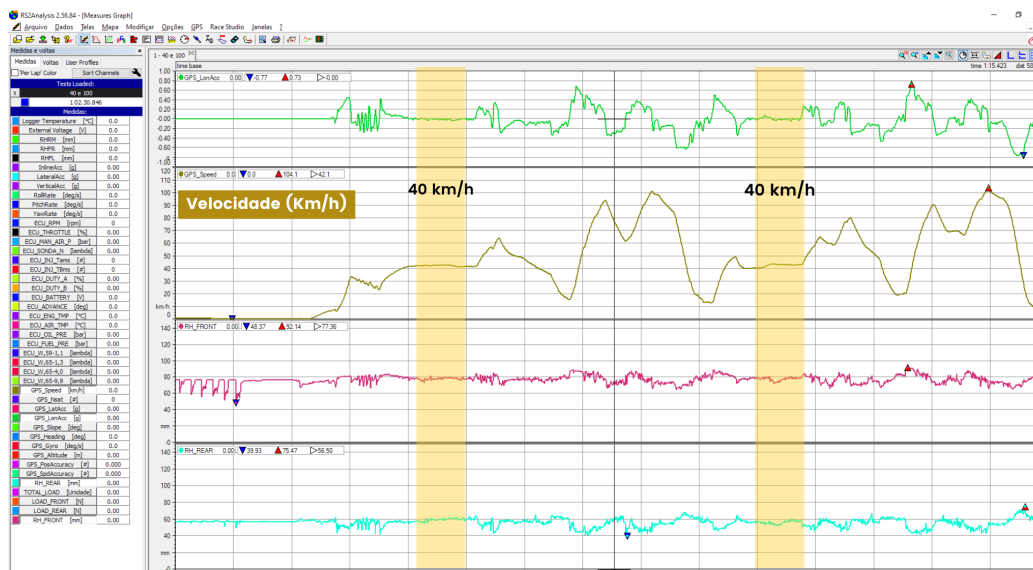


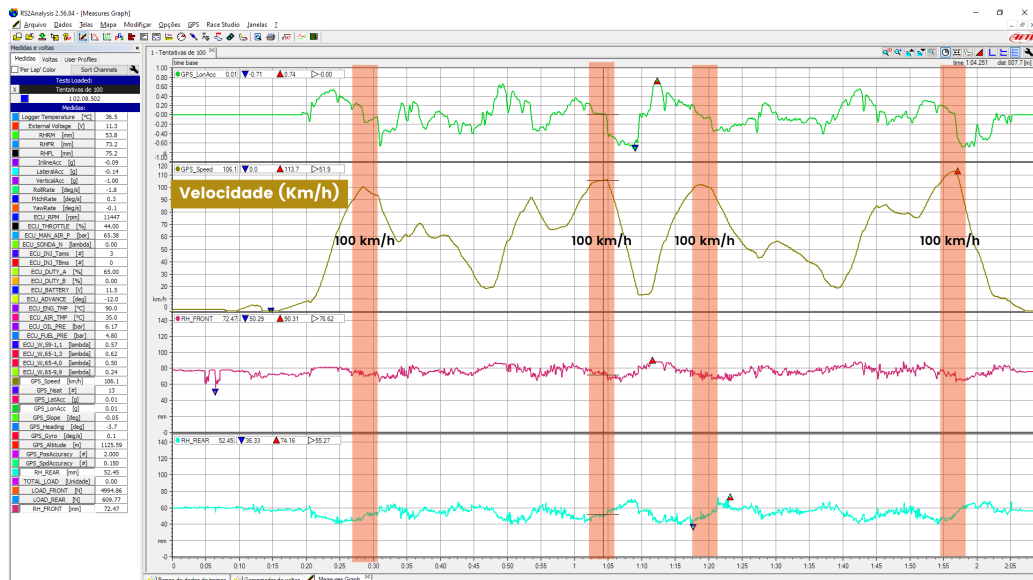
Figura 45: Checagem de sinal dos potenciômetros pré-teste.

### 3.2.4 Teste

No pré-teste, identificou-se que não seria possível seguir o exato procedimento indicado, uma vez que a reta não tinha comprimento suficiente. Optou-se então pela realização de passadas a 40 km/h e a 100 km/h de forma separada, tentando manter a maior velocidade constante pelo máximo intervalo de tempo possível. As faixas vermelhas e amarelas da Figura 46, destacam momentos a 40 e 100 km/h, respectivamente.



(a) Trechos à 40 km/h



(b) Trechos à 100 km/h

Figura 46: Trechos percorridos à 40 e 100 km/h

Apesar da massa do combustível representar somente 2,69% da massa total do veículo, manteve-se o tanque cheio durante todo o teste, por meio de abastecimentos periódicos, para que este parâmetro não tivesse influência significativa nas medições realizadas.

As condições climáticas durante as baterias de teste foram medidas periodicamente. A Tabela 5 mostra as variáveis medidas.

Tabela 5: Condições de climáticas medidas durante o teste.

<b>Temperatura ambiente (°C)</b>	32	31	30	30
<b>Temperatura da pista (°C)</b>	42	38	35	34
<b>Pressão Atmosférica (Pa)</b>	100830	100871	100938	100925
<b>Umidade relativa (%)</b>	41	38	43	41

## CAPITULO 4

### RESULTADOS

#### 4.1 Simulação de Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Existem duas formas de se avaliar a aerodinâmica de um corpo em movimento. Uma delas é a qualitativa, na qual são observados os efeitos da geometria dos corpos ao interagir com ar, e a outra forma é a quantitativa, onde cálculos são feitos para determinar os parâmetros de interesse para o projetista, como: pressão, velocidade, forças e momentos (MCBEATH, 2017).

Na simulação de Fluidodinâmica Computacional, é possível analisar a aerodinâmica de um corpo em movimento tanto de forma quantitativa, quanto de forma qualitativa. Porém, este trabalho tem como foco medir de forma quantitativa, e comparar as medições com a simulação numérica que já foi realizada pela equipe. Os cálculos foram realizados em regime permanente, pelo fato do baixo poder computacional disponível e pela complexidade de se realizar simulações em regime transiente.

A simulação foi feita no *software Fluent* da empresa *Ansys*, seguindo o passo a passo:

- Simplificação e preparação da geometria do veículo;
- Discretização do modelo por meio de uma malha de volumes finitos;
- Modelagem da física envolvida através das condições de contorno do problema;
- Solução das equações que modelam o problema;
- Pós-processamento e visualização dos resultados.

A Figura 47 mostra o modelo simplificado, proveniente do projeto em CAD do veículo. São conservados apenas os componentes que causam maior impacto nos resultados: asas, chassi e carenagem, rodas e suspensão e radiadores. O veículo também é considerado como simétrico, o que reduz o número de elementos da malha pela metade, reduzindo o tempo de simulação.

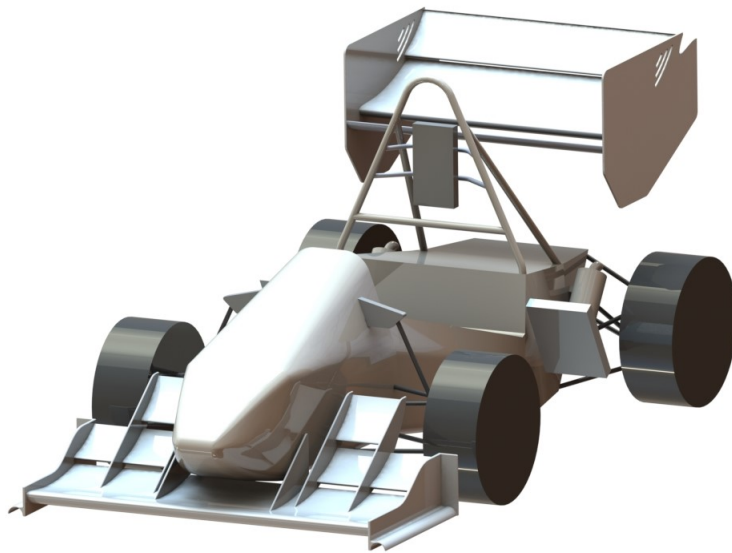


Figura 47: Modelo simplificado para simulação CFD (APUAMA RACING, 2021)

A Figura 48 mostra a discretização do modelo, gerando uma malha de elementos do tipo *Poly-hexcore*.

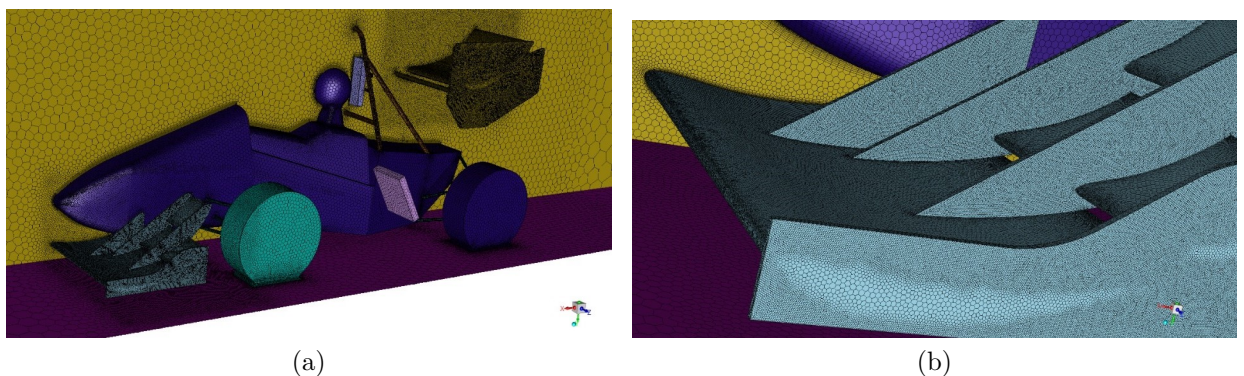


Figura 48: Malha construída para simulação. (a) Discretização do carro inteiro. (b) Discretização da asa dianteira. (APUAMA RACING, 2021)

Antes da realização do teste, a simulação já havia sido realizada utilizando condições climáticas arbitrárias. Após a medição da temperatura, umidade e pressão ambiente



durante o procedimento, o modelo foi reprocessado, utilizando as condições climáticas observadas durante os testes.

A Tabela 6 mostra alguns dos parâmetros importantes para a definição das condições de contorno da simulação numérica.

Tabela 6: Parâmetros para definição das condições de contorno do problema.

<b>Pressão Ambiente (Pa)</b>	101
<b>Densidade (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</b>	1,17
<b>Temperatura (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	31
<b>Viscosidade Dinâmica (Pa.s)</b>	$18,65 \times 10\text{e-}6$
<b>Modelo de turbulência</b>	K-W SST
<b>Velocidade do Ar (km/h)</b>	100
<b>Rotação das Rodas (rpm)</b>	109

Um pós processamento de pressão pode ser visto na Figura 49. A pesar de não ser o foco do trabalho, é possível observar a distribuição de pressão ao longo do veículo, por exemplo. Os gradientes de pressão provocados pelos dispositivos aerodinâmicos são os grandes responsáveis pela geração das cargas medidas.

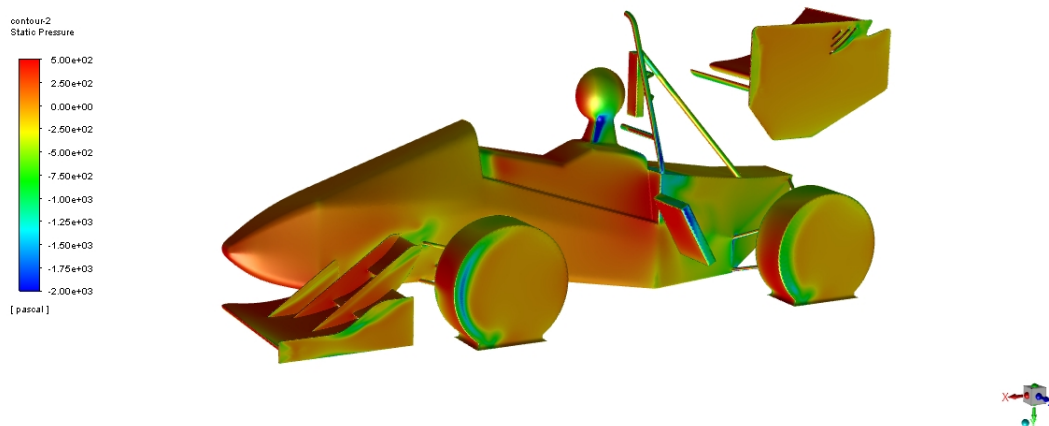
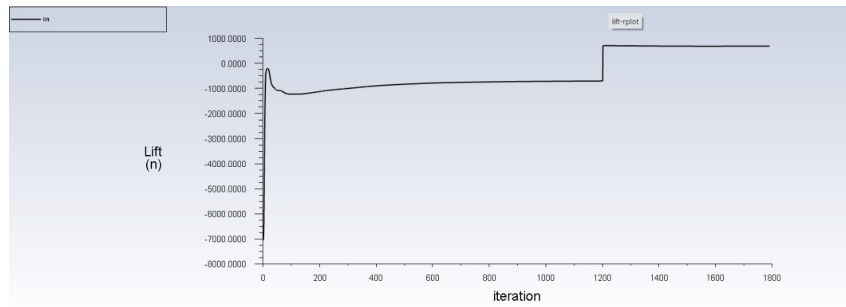


Figura 49: Distribuição de pressão ao longo do carro. (APUAMA RACING, 2021)

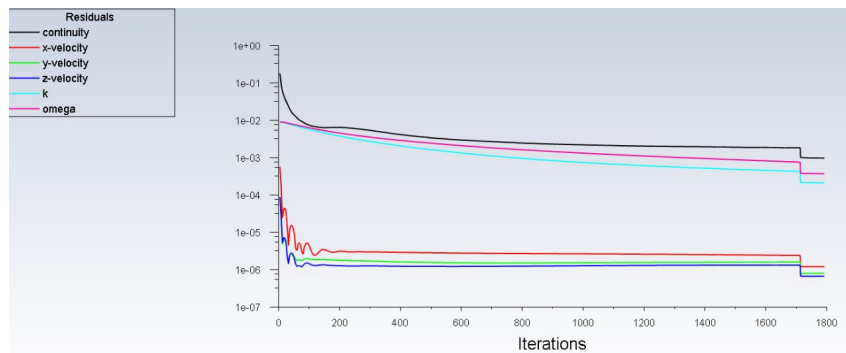
Por se tratar de um método numérico, mais especificamente o Método dos Volumes Finitos, os parâmetros de interesse precisam convergir para um valor específico, apresentando o mínimo de flutuação possível.

A Figura 50a mostra a curva resultante do processo iterativo para cálculo do *down-force*. O salto mostrado por volta de 1200 iterações, ocorreu devido a uma mudança intencional no sinal do parâmetro, feita apenas para que o resultado fosse positivo.

As curvas da Figura 50b mostram a convergência dos resíduos. Esses parâmetros quantificam o erro na solução do sistema de equações que definem o modelo.



(a)



(b)

Figura 50: Gráficos gerados na simulação. (a) Convergência de *downforce*. (b) Resíduos. (APUAMA RACING, 2021).

As Tabelas 7 e 8 resumem os resultados da simulação numérica, que são de interesse para a realização deste trabalho.

Tabela 7: Resultados da simulação a 100 km/h

<b>Downforce Total (N)</b>	1370
<b>CL</b>	1,090
<b>Asa Dianteira (N)</b>	819
<b>Asa Traseira (N)</b>	616
<b>Balanco Aerodinâmico (%)</b>	57

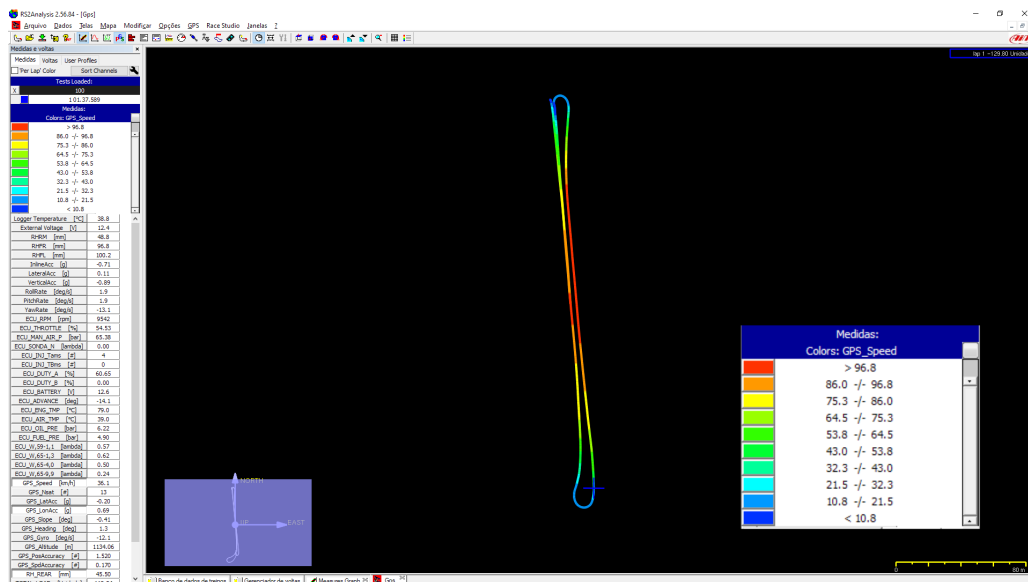
Tabela 8: Resultados da simulação a 40 km/h.

<b>Downforce total (N)</b>	185,00
<b>CL</b>	1,136
<b>Asa Dianteira (N)</b>	108
<b>Asa Traseira (N)</b>	77
<b>Balanco Aerodinâmico ( %)</b>	58

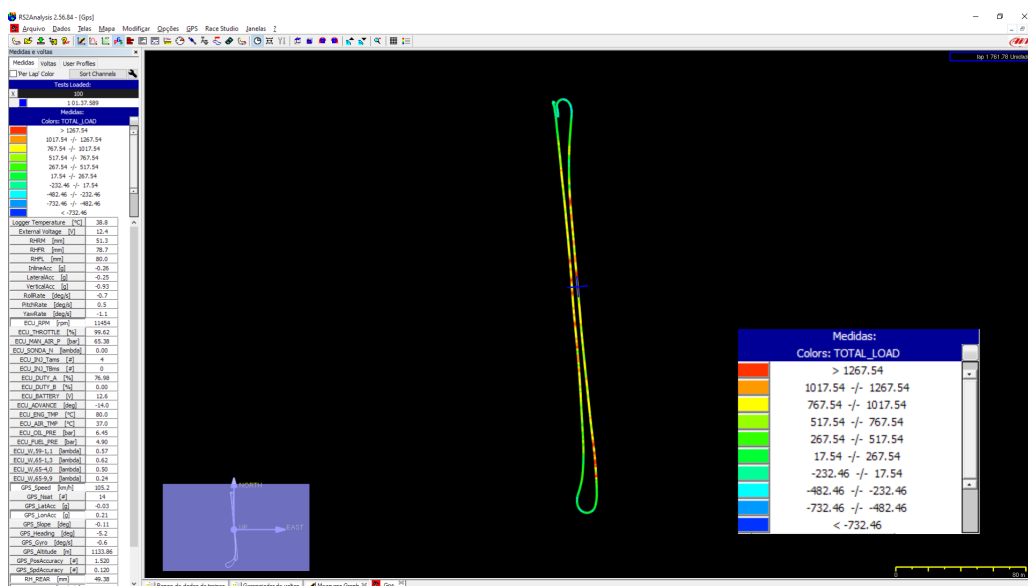
### 4.1.1 Resultados dos testes em pista

Antes de analisar os valores obtidos, é importante verificar se o comportamento do carro foi o esperado. A hipótese era de que, por exemplo, em maiores velocidades, maiores cargas seriam medidas. Como pode ser visto nas Figuras 51a e 51b, regiões mais próximas do meio da pista indicam os maiores valores de velocidade e, por consequência, maiores valores de *downforce*.

Na figura 51b, observa-se regiões pontuais vermelhas, que indicam cargas maiores que 1200 N. Isso acontece porque este tipo de visualização também mostra os picos de carga dinâmica devido a aceleração e frenagem.



(a) Velocidade durante o teste.



(b) *downforce* durante o teste.

Figura 51: Velocidade e *downforce* plotados na pista de teste.

### 4.1.2 Medições a 40 km/h

Do período total de gravação, foram selecionados intervalos nos quais a aceleração longitudinal se manteve o mais próxima de zero possível, para garantir que a variação de velocidade fosse a menor possível, Figura 52. Nesses trechos, foram calculadas as médias dos valores medidos que estão apresentados na Tabela 9.

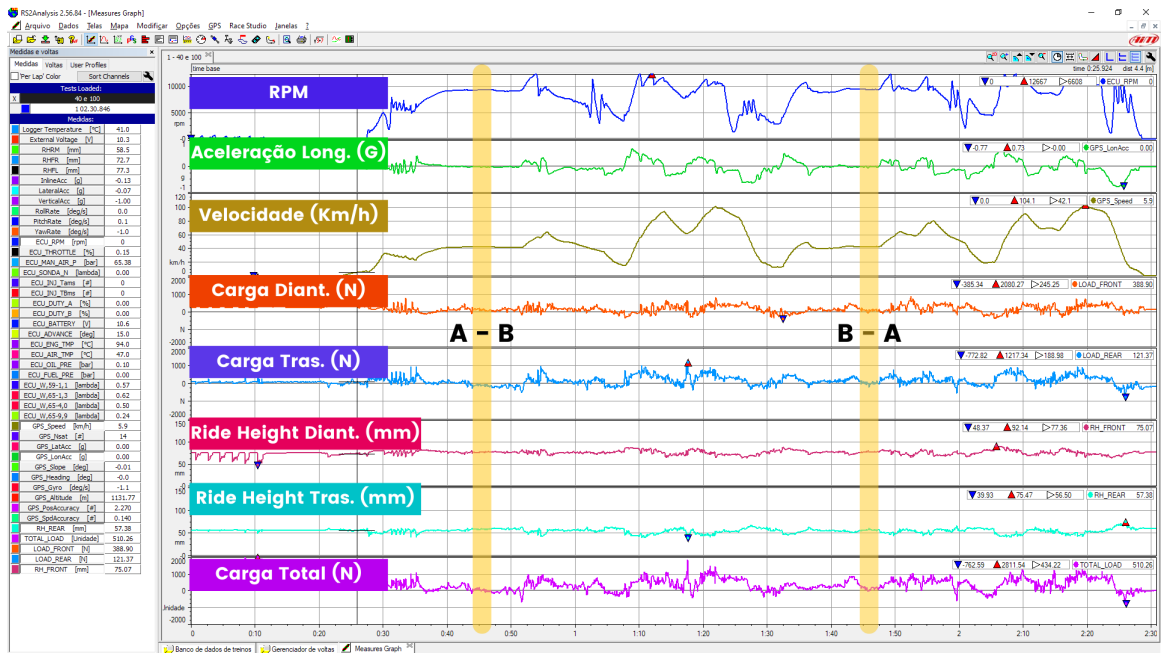


Figura 52: Intervalos usados para a cálculo da carga a 40 km/h

A Tabela 9 apresenta as forças calculadas a partir das medições feitas pelos sensores laser das duas passadas realizadas a 40 km/h. O objetivo dessas passadas foi estabilizar as cargas sobre as rodas, e utilizá-las como base para calcular as cargas geradas em maiores velocidades, como recomendado por Segers (2014).

Tabela 9: Resultados calculados a partir das medições feitas pelos sensores laser.

	<b>Velocidade Média: 40 km/h (Sentido A-B)</b>
<b>Carga Total (N)</b>	-234,0
<b>Aceleração (G)</b>	0,002
<b>Velocidade (km/h)</b>	42,0
<b>Carga Dianteira (N)</b>	-80,0
<b>Carga Traseira (N)</b>	-153,0
<b>Balanco (%)</b>	34,0

	<b>Velocidade Média: 40 km/h (Sentido B-A)</b>
<b>Carga Total (N)</b>	-209,0
<b>Aceleração Long. (G)</b>	-0,001
<b>Velocidade (km/h)</b>	43,0
<b>Carga Dianteira (N)</b>	-146,0
<b>Carga Traseira (N)</b>	-62,0
<b>Balanco (%)</b>	70,0

A Tabela 10 apresenta as forças calculadas a partir das medições feitas pelos potenciômetros lineares, das duas passadas realizadas a 40 km/h.

Tabela 10: Resultados calculados a partir das medições feitas pelos potenciômetros.

	<b>Vel. Média: 40 km/h (Sentido A-B)</b>
<b>Carga total (N)</b>	-93,00
<b>Aceleração Long. (G)</b>	0,002
<b>Velocidade (km/h)</b>	42
<b>Carga traseira (N)</b>	-72,00
<b>Carga Dianteira (N)</b>	-21,00
<b>Balanco Aerodinâmico ( %)</b>	23

	<b>Vel. Média: 40 km/h (Sentido B-A)</b>
<b>Carga total (N)</b>	-241,00
<b>Aceleração Long. (G)</b>	-0,001
<b>Velocidade (km/h)</b>	43
<b>Carga traseira (N)</b>	-207,00
<b>Carga Dianteira (N)</b>	-33,00
<b>Balanco Aerodinâmico ( %)</b>	14

Os valores negativos de carga total indicam que, ao invés da geração de *downforce*, foi gerada sustentação. Uma possível explicação para isso é que as asas geram um nível de *downforce* nessa velocidade, insuficiente para vencer a rigidez dos pneus e das molas, e causar deslocamentos verticais descendentes no chassi, resultando em uma medição imprecisa.

Como os potenciômetros lineares medem apenas os deslocamentos dos amortece-

dores, esperava-se que a carga calculada através dos dados medidos por eles, a 40 km/h, fosse menor do que aquela calculada a partir do deslocamento dos sensores laser. No entanto, como pode ser observado na Tabela 10, este comportamento não foi observado, indicando novamente uma imprecisão nas medições nessa velocidade.

### 4.1.3 Medições a 100 km/h

Do período total de gravação, foram selecionados intervalos nos quais a aceleração longitudinal se manteve o mais próxima de zero possível, para garantir que a variação de velocidade fosse a menor possível, Figura 53. Nesses trechos foram calculadas as médias dos valores medidos que estão apresentadas na Tabela 11.

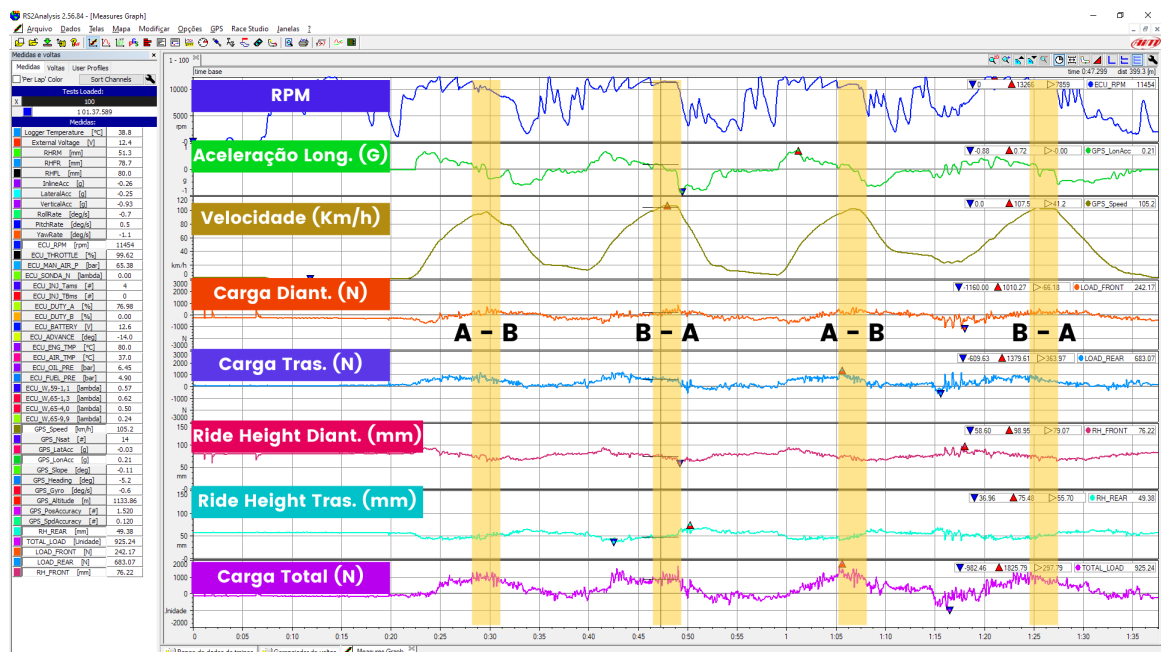


Figura 53: Intervalos usados para a cálculo da carga a 100 km/h

A Tabela 11 resume os resultados das passadas a 100 km/h. É evidente que os níveis de *downforce* gerados nessa faixa de velocidade são bem maiores que os medidos a velocidade de 40 km/h. Entretanto, estes ainda não são os valores finais. Seguindo a metodologia proposta por Segers (2014), é preciso subtrair deles, a média dos valores obtidos a 40 km/h, para que tenhamos a variação de carga real.

Tabela 11: Resultados calculados a partir das medições feitas pelos sensores laser.

	A - B	B - A	A - B	B - A
<b>Downforce (N)</b>	1022,00	1055,00	1200,00	852,00
<b>Aceleração Long. (G)</b>	-0,324	-0,026	-0,048	-0,002
<b>Velocidade (km/h)</b>	91,00	107,00	102,0	102,00
<b>Carga Dianteira (N)</b>	557,00	581,00	584,00	449,00
<b>Carga Traseira (N)</b>	466,00	474,00	616,00	403,00
<b>Balanco (%)</b>	55,00	55,00	49,00	53,00

A Tabela 12 apresenta as cargas calculadas a partir das medições feitas pelos potenciômetros lineares das duas passadas realizadas a 100 km/h.

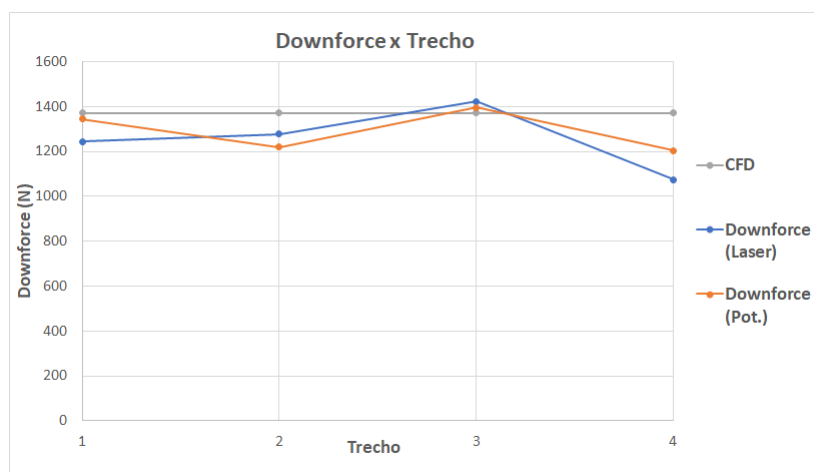
Tabela 12: Resultados calculados a partir das medições feitas pelos potenciômetros.

	A - B	B - A	A - B	B - A
<b>Carga total (N)</b>	1178,00	1053,00	1229,00	1037,00
<b>Aceleração Long. (G)</b>	-0,324	-0,026	-0,048	-0,002
<b>Velocidade (km/h)</b>	91,00	107,00	102,00	102,00
<b>Carga traseira (N)</b>	778,00	625,00	824,00	667,00
<b>Carga Dianteira (N)</b>	400,00	428,00	405,00	370,00
<b>Balanco Aerodinâmico ( %)</b>	34	41	33	36

É possível notar pelos valores obtidos a 100 km/h, que a precisão dos métodos de medição para esta velocidade já é significativamente melhor. Para os cálculos de carga total, por exemplo, quase todos os valores ficaram entre 1000 e 1200 Newtons.

#### 4.1.4 Comparação dos Resultados

As Figuras 51, 52 e 53 mostram a comparação dos resultados de *downforce*, balanço aerodinâmico e coeficiente de *downforce*, para os trechos das Tabelas 11 e 12.

Figura 54: *Downforce* por trecho: Comparação entre os métodos de medição

Na Figura 54, a curva cinza representa o *downforce* total obtido através de simulação, por isso o seu valor é constante. A curva laranja mostra o resultado calculado através das medições do potenciômetro, e a curva azul, através dos sensores laser. Nota-se que o desvio da simulação, em relação às medições em pista é relativamente baixo.

Esperava-se que as forças calculadas através das medições pelos potenciômetros fossem relativamente menores que as calculadas através das medições dos sensores laser, porém, pela Figura 54 não é possível fazer esta afirmação. Talvez a diferença seja pequena, o que faz com que seja necessária a realização de um volume maior de testes para visualização dessa diferença.

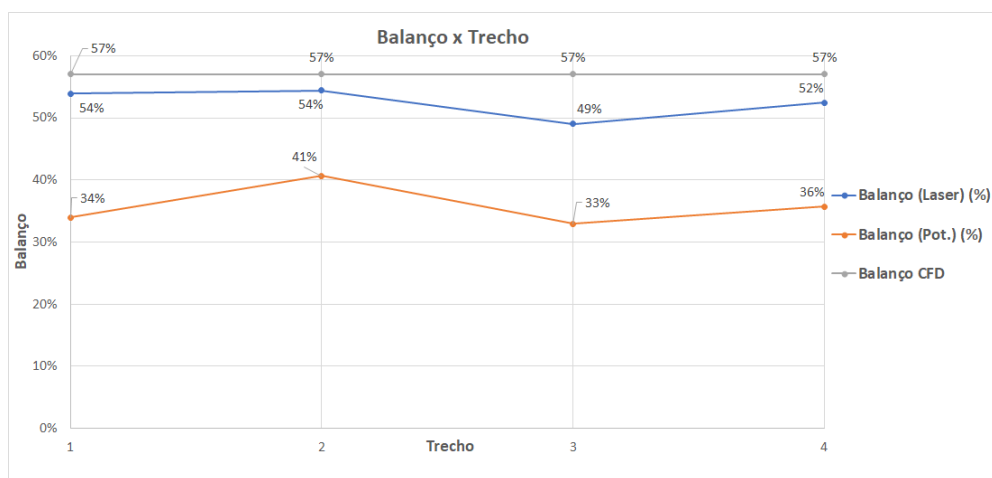


Figura 55: Balanço por trecho: Comparação entre os métodos de medição

O balanço aerodinâmico obtido a partir da simulação CFD se aproxima mais do valor calculado a partir das medições dos sensores laser, Figura 55. Já os valores calculados a partir das medições do potenciômetro apresentam um desvio significativo em relação à simulação.

Foi observado através dos deslocamentos dos potenciômetros que o amortecedor dianteiro direito, provavelmente, apresenta um comportamento anormal, como pode ser visto na Figura 56. O seu deslocamento é menor do que o de todos os outros, que trabalham em uma faixa mais próxima entre si.



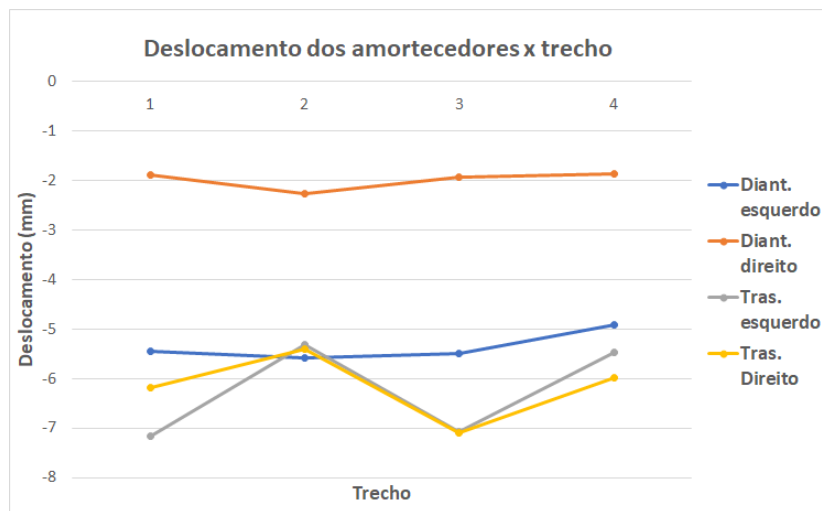


Figura 56: Deslocamento: comparação entre amortecedores

O coeficiente de *downforce* obtido através de simulação também se mostrou relativamente próximo dos calculados através das medições em pista, Figura 57.



Figura 57: Coeficiente de *Downforce* por trecho: Comparação entre os métodos de medição

A Equação 20 foi utilizada para calcular as diferenças entre os valores experimentais e numéricos.

$$Diferença\% = \frac{|X_{Pista} - X_{CFD}|}{X_{Pista}} * 100 \quad (20)$$

onde  $X_{Pista}$  é a média das cargas totais obtidas através de cada método experimental e  $X_{CFD}$  é o valor obtido na simulação CFD.

Tabela 13: Diferença da simulação em relação as medições.

	<b>Carga Total (N)</b>	<b>Balanço (%)</b>	<b>CL</b>
<b>Laser (%)</b>	9,3	8,7	2,6
<b>Potenciômetro (%)</b>	6,1	37,2	9,1

A maior diferença observada para o balanço aerodinâmico para as medições feitas através dos potenciômetros é justificado devido ao funcionamento anormal do amortecedor dianteiro direito mostrado na Figura 56.

## 4.2 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo realizar a validação do projeto aerodinâmico do AF20, protótipo da equipe de Fórmula SAE Apuama Racing, por meio da obtenção experimental do *downforce* total do veículo, possibilitando os cálculos do coeficiente de *downforce* e da balanço aerodinâmico nos eixos.

Para a realização das medições em pista, foram desenvolvidos suportes específicos que possibilitaram a instalação segura dos sensores no veículo.

Os resultados das medições a 40 km/h mostraram que, ao invés de indicar *downforce*, os dados obtidos mostram uma geração de Sustentação. Isso pode ocorrer porque o nível de *downforce* não é suficiente para causar deslocamentos consideráveis na suspensão do carro.

As medições a 100 km/h, apresentaram um resultado satisfatório, indicando que os dispositivos aerodinâmicos do veículo são capazes de gerar altas cargas, tendo importante influência no seu comportamento dinâmico.

Após o cálculo do *downforce* total, fazendo a subtração da carga obtida a 100 km/h daquela obtida a 40 km/h, seguindo a metodologia de Segers (2014), foi possível fazer a comparação com os valores obtidos por simulação numérica. Em relação as medições dos sensores laser e dos potenciômetros, o valor de carga total calculado por simulação apresentou uma diferença de 9,3% e 6,1%, respectivamente. É um valor satisfatório, uma vez que existem várias fontes de incerteza presentes em todo o processo, desde a simplificação do modelo usado para simulação, até incertezas geométricos causados pelos métodos de fabricação das asas, bem como as condições em que os testes foram realizados.

Não foi possível observar uma diferença significativa na comparação entre as forças calculadas através dos dois métodos de medição, o que pode indicar que as deformações dos pneus com a carga gerada a 100 km/h são pequenas.

Seguindo a linha deste trabalho, uma sugestão para trabalhos futuros seria o uso da extensometria diretamente nos suportes das asas do veículo. Com extensômetros nas asas é possível reduzir as fontes de incerteza na medição das cargas e ter uma maior sensibilidade, para aferições mais precisas.

Uma outra abordagem para novos trabalhos, é refazer os testes em linha reta, variando configurações de ângulo de asa. Com isso, é possível definir quais configurações são responsáveis por entregar a maior eficiência aerodinâmica.

A implementação de um tubo de pitot para realização de novos testes também pode trazer informações ainda mais detalhadas a respeito do desenvolvimento aerodinâmico da equipe.

## Referências Bibliográficas

ABID, S. **What Should The Temperature Of Your Racing Car Tyres Be?** 2020. Disponível em: <<https://www.yourdatadriven.com/about-samir-abid-your-data-driven/>>.

ANAND, V. **Plot Pressure Distribution (Cp) Over an Airfoil / Aerofoil ; Vector Plot ; Arrow Plot.** 2014. Disponível em: <[encurtador.com.br/fGLQX](http://encurtador.com.br/fGLQX)>.

ANDERSON, J. D. **Fundamentals of Aerodynamics.** 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2010. 1152 p. ISSN 1098-6596. ISBN 9788578110796.

ANDERSON, J. D. **Fundamentos de engenharia aeronáutica.** [S.l.]: AMGH Editora, 2015.

ANGLE. **Angle of Attack.** 2018. Disponível em: <<http://www.aviationchief.com/angle-of-attack.html>>.

APUAMA, R. **Equipe de Formula SAE Apuama Racing.** 2017. Disponível em: <[https://www.flickr.com/photos/apuamaracing\\_raw/albums](https://www.flickr.com/photos/apuamaracing_raw/albums)>.

APUAMA, R. **Equipe de Formula SAE Apuama Racing.** 2018. Disponível em: <[https://www.flickr.com/photos/apuamaracing\\_raw/albums](https://www.flickr.com/photos/apuamaracing_raw/albums)>.

BAUMER. **Distance Sensor.** [S.l.], 2017.

CASE, D. **History of FSAE...** 1995. Disponível em: <[www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72](http://www.fsaeonline.com/page.aspx?pageid=c4c5195a-60c0-46aa-acbf-2958ef545b72)>.

CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos.** 3. ed. [S.l.]: Amgh Editora, 2015. 1016 p. ISBN 8580554918.

F1 TECHHUB. **Reason behind "smoke" or "mist" coming off rear wing of F1 car.** 2019. Disponível em: <<https://f1techhub.blogspot.com/>>.

F1 TECHNICAL. **Williams pitot tube measurement array.** 2013. Disponível em: <<https://www.f1technical.net/gallery/2013/barcelona-test-28/williams-pitot-array>>.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introducao a Mecanica dos Fluidos.** [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. 816 p.

GALIMI, M. **Tech—Why The G-Meter Is The Most Important Sensor For Going Fast.** 2018. Disponível em: <<https://www.racepagesdigital.com/tech-why-the-g-meter-is-the-most-important-sensor-for-going-fast/>>.

GEFRAN. **RECTILINEAR DISPLACEMENT TRANSDUCER**. [S.l.], 2015.

GROUND. **Ground effect**. 2008. Disponível em: <[http://www.formula1-dictionary.net/ground\\_effect.html](http://www.formula1-dictionary.net/ground_effect.html)>.

HASANOVIC, V. **Formula 1 Aerodynamics – Basics of Aerodynamics and Fluid Mechanics, part II**. 2018. Disponível em: <<https://www.f1supernews.com/2018/08/14/formula-1-aerodynamics-basics-of-aerodynamics-and-fluid-mechanics-part-ii/>>.

HUCHO, W.; SOVRAN, G. Aerodynamics of road vehicles. **Annual review of fluid mechanics**, Annual Reviews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA, v. 25, n. 1, p. 485–537, 1993. ISSN 0066-4189.

JAZAR, R. N. **Vehicle dynamics: theory and application**. [S.l.]: Springer, 2017. ISBN 3319534416.

KATZ, J. **Race Car Aerodynamics**. 2. ed. [S.l.]: Bentley Publishers, 1995. 280 p. ISBN 0837601428.

KONELEK. **Road Arrow Formula Student team starts testing**. 2016. Disponível em: <<https://aero.konelek.com/road-arrow-formula-student-team-starts-testing/>>.

MATOS, P. **Falcon Heavy: um novo marco da exploração espacial**. 2018. Disponível em: <<http://www.simi.org.br/noticia/Falcon-Heavy-um-novo-marco-da-exploracao-espacial>>.

MCBEATH, S. **Competition Car Aerodynamics**. 3. ed. [S.l.]: Veloce Publishing Ltd, 2017. 551 p.

MCGILL. **FSAE East Competition Recap**. 2015. Disponível em: <<https://blogs.mcgill.ca/fsae/2015/05/20/fsae-east-competition-recap/>>.

MILLIKEN, W. F.; MILLIKEN, D. L. **Race car vehicle dynamics**. Society of Automotive Engineers, 1994. 918 p. ISBN 978-1560915263. Disponível em: <<https://www.sae.org/publications/books/content/r-146/>>.

MYWEATHER2. **Autodromo Internacional Nelson Piquet Weather Forecast**. 2021. Disponível em: <<https://www.myweather2.com/Motor-Racing/Brazil/Autodromo-Internacional-Nelson-Piquet.aspx>>.

PETRIC, D. **Ferrari presents their new 2020 F1 car – SF1000**. 2020. Disponível em: <<https://maxf1.net/en/ferrari-presents-their-new-2020-f1-car-sf1000/>>.

RODRIGUES, L. E. M. J. **Fundamentos de Engenharia Aeronáutica**. [S.l.]: Cengage Learning, 2013. 15–112 p.

SAE International. **Vehicle Dynamics Terminology**. p. 73, 2008. Disponível em: <[https://www.sae.org/standards/content/j670\\_200801/](https://www.sae.org/standards/content/j670_200801/)>.

SEGERS, J. **Analysis Techniques for Racecar Data Acquisition - Second Edition**. 2. ed. [S.l.]: SAE International, 2014. 536 p. ISBN 9780768080810.

SEWARD, D. **Race Car Design**. [S.l.]: Red Globe Press, 2014. 228 p.

SMITH, C. **Tune To Win**. [S.l.]: Carroll Smith Consulting, 1978. 172 p. ISBN 0879380713.

SOLIDWORKS. **Convection**. 2019. Disponível em: <[http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c\\_convection.htm](http://help.solidworks.com/2019/english/SolidWorks/cworks/c_convection.htm)>.

TALAY, T. A. Introduction to the Aerodynamics of Flight. v. 66, p. 37–39, 1975.

TECHNICAL. **Video: Technical analysis - how a Formula 1 rear wing works**. 2019. Disponível em: <<https://www.autosport.com/f1/news/142293/video--how-an-f1-rear-wing-works>>.

TOET, W. Aerodynamics and aerodynamic research in Formula 1. **Aeronautical Journal**, v. 117, n. 1187, p. 1–26, 2013. ISSN 00019240.