UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MATEUS MORANDINI DE OLIVEIRA

"Influência dos Dispositivos Aerodinâmicos em um veículo de Fórmula SAE"

Ilha Solteira

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

MATEUS MORANDINI DE OLIVEIRA

INFLUÊNCIA DOS DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS EM UM VEÍCULO DE FÓRMULA SAE

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani

Orientador

Ilha Solteira, 2023

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Oliveira, Mateus Morandini de.
O48i Influência dos dispositivos aerodinâmicos em um veículo de fórmula SAE / Mateus Morandini de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
74 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Márcio Antonio Bazani

Inclui bibliografia

1. Aerodinâmica veícular . 2. Dispositivos aerodinâmicos. 3. Fórmula SAE. 4. Tempos de volta. 5. Skid Pad.

Amanda Sertori dos Santos
Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO : INFLUÊNCIA DOS DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS EM UM VEÍCULO DE FÓRMULA SAE

ALUNO : Mateus Morandini de Oliveira RA: 152053956

Orientador: Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani

Aprovado (x) – Reprovado ( ) pela Comissão Examinadora

Nota: 7,0

Comissão Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
MARCIO ANTONIO BAZANI
Data: 16/12/2023 16:48:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

. _____

Prof. Márcio Antônio Bazani

gov.br Documento assinado digitalmente
EDUARDO PRETO
Data: 14/12/2023 15:24:24-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

. _____

Eduardo Preto

gov.br Documento assinado digitalmente
HEITOR NUNES ROSA
Data: 15/12/2023 10:58:22-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

. _____

Heitor Nunes Rosa

_____

Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP), 14 de dezembro de 2023.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por todo o suporte proporcionado durante minha graduação, que foi providencial para que eu conseguisse chegar aonde cheguei. Tenho somente que agradecer a todo o esforço feito por vocês, sei que não foi fácil, mas valeu a pena.

Agradeço a meus amigos da “República Moita”, que foram minha segunda família durante toda a graduação, e que me deram todo o suporte no dia a dia. Talvez vocês não tenham dimensão do tanto que foram importantes para mim durante toda essa fase, muito obrigado. Juntamente a eles, agradeço as repúblicas “João e Maria” e “Transatlântico”, que mesmo eu não morando com vocês, fizeram grande parte dos meus dias e me ajudaram a melhorar sempre. Levarei vocês para a vida toda.

Agradeço à minha namorada, Tainá, que esteve ao meu lado durante todo esse tempo e que ajudou muito deixando as coisas mais leves e me apoiando sempre.

Agradeço ao grupo Fênix Racing de Fórmula SAE, que me motivou a seguir com meu sonho de ser um Engenheiro Mecânico e me deu propósito em continuar focados nos projetos desenvolvidos. Essa equipe foi providencial na minha formação como engenheiro por me fazer ter contato com a aplicação da Engenharia Mecânica desde o meu primeiro semestre de faculdade.

Agradeço ao time da Mercedes-Benz do Brasil de Pós Venda de caminhões e ônibus, onde pude ter o primeiro contato com o mercado de trabalho no setor automobilístico. Esse período de estágio foi de grande valor para meu desenvolvimento tanto profissional quanto pessoal.

Agradeço também ao time da Raízen Combustíveis S.A, meu segundo estágio, onde tive oportunidade de atuar novamente em uma empresa enorme e que me ensinou muito durante os 7 meses de estágio.

Agradeço por fim ao meu orientador Prof. Dr. Márcio Antônio Bazani por toda a paciência, suporte e conhecimento dados durante toda a confecção deste Trabalho. Aprendi muito com o senhor não só no sobre engenharia, mas também sobre conhecimento, respeito e humildade.

RESUMO

Os dispositivos aerodinâmicos foram desenvolvidos com o intuito de melhorar o desempenho dos veículos de corrida como um todo, a partir da interação do ar com sua superfície. O presente trabalho tem como finalidade avaliar a influência que esses dispositivos têm ao ser implementados em um veículo de Fórmula SAE por meio da análise dos tempos de volta em um circuito em formato circular, chamado de *Skid Pad*, primeiramente sem os dispositivos e posteriormente fazendo o uso deles. Os testes pré competição foram utilizados para obter os tempos de volta do carro sem os dispositivos aerodinâmicos, e durante a competição de 2022 foi possível obter os tempos com a presença deles. A partir da análise dos tempos de volta durante a competição e testes foi possível notar a melhora do desempenho ao realizar o *Skid Pad*, com tempos de volta menores e maior velocidade desenvolvida durante o circuito. Ao final dos estudos observou-se que os dispositivos aerodinâmicos influenciaram de maneira positiva o desempenho do veículo, mesmo sendo um circuito limitado, que não permite atingir altas velocidades durante a realização da prova.

Palavras-chave: Aerodinâmica veicular. Dispositivos aerodinâmicos. Fórmula SAE. Tempos de volta. *Skid Pad*.

ABSTRACT

Aerodynamic devices were developed focusing the improvement of the racing vehicles performance based on the interaction of air with their surface. This work aims to evaluate the influence that these devices have when implemented in a Formula SAE vehicle, through lap times analysis on a circular-shaped circuit, called Skid Pad, first without the devices and using them afterwards. Pre-competition tests enabled to obtain the car's lap times without the aerodynamic devices, and during the 2022 competition it was possible to obtain the lap times with their presence. From the analysis of lap times during the competition and tests, it was possible to notice the improvement in performance when running the Skid Pad, with shorter lap times and greater speed developed during the circuit. At the end of the studies, it was observed that the aerodynamic devices had a positive influence on the vehicle’s performance, even though it was a limited circuit, which does not allow reaching high speeds during the laps.

Key words: Vehicle aerodynamics. Aerodynamic devices. Formula SAE. Lap times. Skid Pad.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Perfis de velocidade para diferentes regiões da camada limite. 3
Figura 2 – Exemplo de perfil de asa em formato de “gota d’água” e a influência aerodinâmica..... 5
Figura 3 – Forças que agem em um perfil de asa e seus elementos..... 7
Figura 4 – Comparação entre perfis de asa com e sem simetria. 7
Figura 5 – Experimento caseiro para explicar o Efeito Coanda usando uma colher de cozinha. 9
Figura 6 – Esquema de um perfil de asa sob Efeito Coanda e as forças aerodinâmicas..... 10
Figura 7 –*Undertray* de um carro de Fórmula SAE, com foco em seu difusor. 13
Figura 8 – Veículo de Fórmula 1 em escala real dentro de um túnel de vento durante escoamento de fumaça..... 15
Figura 9 – Momentos aerodinâmicos em um carro de Fórmula 1..... 16
Figura 10 – Variação da velocidade versus o tempo do teste 18
Figura 11 - Exemplo de simulação aerodinâmica computacional do modelo 3D de um veículo de Fórmula SAE. 20
Figura 12– Forças atuantes em um pneu de carro em movimento e sua deformação. 22
Figura 13– Dependência da força lateral dos pneus na força normal versus o ângulo de *slip* lateral. 23
Figura 14 – Relação entre a potência do motor e as forças de resistência 26
Figura 15 – Variação dos coeficientes de *lift* e arrasto versus a distância do carro até o solo..... 29
Figura 16– Inclinação do veículo α e a relação com as forças aerodinâmicas. 30
Figura 17 – Visualização do escoamento ao redor de uma roda em rotação em comparação a uma roda em repouso. 31
Figura 18 – Esquema do balanço aerodinâmico indicando os locais de carga aerodinâmica em um modelo 3D de um carro de Fórmula SAE. 32
Figura 19 – Exemplo de simulação em CFD de uma asa traseira com todos os elementos. 33
Figura 20 – Visualização dos perfis aerodinamicos usados em uma asa traseira. 34
Figura 21 – *Endplates* e *Footplates* em um modelo 3D da asa dianteira simulada em CFD. 34
Figura 22– Típica geometria de *undertray* em veículos de Fórmula SAE..... 36
Figura 23– Efeito do ângulo de saída do difusor nos coeficientes de *lift* e arrasto. 37
Figura 24 – Veículo de Fórmula SAE usado no ano de 2022. 39
Figura 25 – Asa dianteira do carro de 2022. 40
Figura 26 – Asa traseira do carro de 2022. 40
Figura 27 – *Undertray* usado no veículo de 2022. 41
Figura 28 – Carro da Equipe Fênix Racing de 2022 durante a prova de *Skid Pad* na competição nacional. 42
Figura 29 – Esquema do circuito de *Skid Pad* usado na competição. 43
Figura 30 – Modelo 3D em CFD sem os dispositivos aerodinâmicos. 44
Figura 31 – Modelo 3D em CFD com todos os dispositivos aerodinâmicos. 45
Figura 32 – Carro somente com as asas durante simulações em CFD. 46
Figura 33 – Mapa de velocidade do carro somente com as asas durante simulações em CFD..... 46
Figura 34 – Mapa de pressão do *Undertray* no modelo 3D do veículo durante simulações em CFD. . 47
Figura 35 – Mapa de velocidade do *Undertray* no modelo 3D do veículo durante simulações em CFD. 48
Figura 37 – Intensidade da força de Arrasto com a variação de velocidade. 56
Figura 38 – Intensidade da força de *Downforce* com a variação de velocidade. 57
Figura 39 – Representação da distribuição de *downforce* em todo o veículo. 57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa das contribuições no arrasto aerodinâmico de um veículo em pista. 6
Tabela 2 – Coeficientes de *Lift* e arrasto para alguns veículos. 11
Tabela 3 - Estimativa das contribuições no *lift/downforce* de um veículo em pista. 12
Tabela 4 – Parâmetros aerodinâmicos obtidos por simulações numéricas..... 45
Tabela 5 – Parâmetros aerodinâmicos do veículo obtidos por simulações numéricas usando somente as asas. 47
Tabela 6 – Parâmetros aerodinâmicos do veículo obtidos por simulações numéricas usando somente o *undertray*..... 48
Tabela 7 – Tempos de volta e a respectiva velocidade do piloto Mário no *Skid Pad* sem os dispositivos aerodinâmicos. 50
Tabela 8 – Tempo e velocidade média de volta do piloto Mário no Skid Pad sem os dispositivos aerodinâmicos. 51
Tabela 9 – Tempos de volta e respectiva velocidade do piloto Daniel no *Skid Pad* sem os dispositivos aerodinâmicos. 51
Tabela 10 – Tempo e velocidade média de volta do piloto Daniel no Skid Pad sem os dispositivos aerodinâmicos. 52
Tabela 11 – Tempos de volta e respectiva velocidade dos pilotos Mário e Daniel no *Skid Pad* durante a competição, utilizando o pacote aerodinâmico. 52
Tabela 12 – Tempo e velocidade média de volta do pilotos Mário e Daniel no Skid Pad durante a competição, utilizando o pacote aerodinâmico. 53
Tabela 13 – Comparação entre os tempos e velocidades médias de volta dos dois pilotos. 53
Tabela 14 – Comparação do desempenho do veículo para cada piloto e cada configuração aerodinâmica. 54
Tabela 15 – Forças aerodinâmicas atuando no veículo com e sem a presença dos dispositivos aerodinâmicos. 56
Tabela 16 – Distribuição da carga aerodinâmica nos eixos e rodas. 58

LISTA DE SIGLAS

SAE – Society of Automotive Engineers (Sociedade de Engenheiros Automotivos).

CFD – Computational Fluid Dynamics (Dinâmica dos Fluidos Computacional).

3D – Sigla que representa imagens com três dimensões.

CG – Centro de gravidade.

Fx, Fy, Fz – Componentes de força em cada uma das direções do plano cartesiano (x, y e z).

SUMÁRIO

1. OBJETIVO 1

2. INTRODUÇÃO 1

2.1 VISÃO GERAL DA AERODINÂMICA EM CARROS DE CORRIDA 1

2.2 FORÇAS AERODINÂMICAS 2

2.2.1 Arrasto 3

2.2.2 Sustentação e *Downforce* 6

2.2.3 Downforce 10

2.3 PROJETO E VALIDAÇÃO 14

2.3.1 Validações fora da pista 14

2.3.2 Validações em pista 16

2.3.3 Métodos Computacionais – CFD 19

2.4 AERODINÂMICA E PERFORMANCE DO CARRO 21

2.4.1 Pneus 21

2.4.2 Como a aerodinâmica afeta a dinâmica veicular 23

2.5 AERODINÂMICA DO CARRO COMPLETO 28

2.5.1 Geometria da superfície 28

2.5.2 Posição em relação ao solo 28

2.5.3 Fluxo de ar nas rodas 30

2.6 DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS 31

2.6.1 Asas 32

2.6.2 *Undertray* 35

3. MATERIAIS E MÉTODOS 38

3.1 DISPOSITIVOS AERODINÂMICOS 38

3.1.1 Pacote aerodinâmico completo 39

3.2 PROVAS DINÂMICAS DA COMPETIÇÃO 41

3.2.1 *Skid Pad* 42

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 44

4.1 RESULTADOS OBTIDOS USANDO CFD 44

4.2 TESTES PRÉ-COMPETIÇÃO 50

4.3 TEMPOS DE VOLTA NA COMPETIÇÃO 52

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS TEMPOS DE VOLTA E VELOCIDADES MÉDIAS 53

4.5 FORÇAS AERODINÂMICAS 55

5. CONCLUSÕES 59
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

1. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é avaliar a influência dos dispositivos aerodinâmicos em um veículo de Fórmula SAE. O desafio é verificar se mesmo em baixas velocidades esses efeitos são sensíveis no desempenho em pista.

2. INTRODUÇÃO

2.1 VISÃO GERAL DA AERODINÂMICA EM CARROS DE CORRIDA

Tendo em vista o conceito de aerodinâmica, geralmente a primeira definição pensada seria a interação que o fluido ar tem com corpos sólidos, e imediatamente pensa-se em como esse conceito é aplicado no dia a dia. De carros de passeio à energia eólica, a aerodinâmica possui grande importância na Engenharia como um todo, porém o foco será dado na interação do ar com veículos de alta performance.

Ao analisar a geometria que os carros de alta performance têm, é possível observar que atualmente é seguido um padrão que tem por característica fundamental a otimização da interação entre o veículo e as forças aerodinâmicas, tanto na questão de resistência do ar quanto dirigibilidade.

Quando pensamos na influência da aerodinâmica em um veículo, algumas pessoas podem argumentar que um carro não tem tanta interferência do ar pois as velocidades não são muito altas. Contudo, basta colocarmos a mão para fora da janela de um carro em movimento para sentirmos como o ar tem significativa influência em um corpo dessa dimensão em deslocamento. Caso essa pessoa ainda não esteja convencida, basta lembrar que uma aeronave com dezenas de toneladas de massa consegue voar enormes distâncias devido às suas asas e geometria otimizada, uma vez que seus motores geram somente movimento horizontal (KATZ, 1995).

Para explicar brevemente como uma asa consegue gerar tamanha força, pode-se aplicar dois teoremas importantes da Mecânica dos Fluidos, Bernoulli (KATZ, 1995) e Coanda (FAA, 2012). Por uma questão de preferência, foram colocadas as duas abordagens, porém o foco foi dado à teoria desenvolvida por Coanda. Ambas estão devidamente explicadas na seção 2.2.

Quanto à geometria otimizada que foi anteriormente citada, pode-se traduzir como a diminuição da resistência que o corpo sofre pelo ar quando em movimento. O foco no desenvolvimento de carros, principalmente os populares, é na diminuição dessa resistência, ou Arrasto, a fim de diminuir o consumo de combustível uma vez

que o corpo passa a se deslocar com menor resistência ao seu movimento pois exige menos esforço. No caso do desenvolvimento de carros de corrida, a diminuição do arrasto não é tanto o foco quanto o aumento da dirigibilidade, ou como é chamado geralmente, *Downforce*, a sustentação negativa.

A sustentação negativa, ou *downforce*, é a responsável por aumentar o controle que o piloto tem sobre o carro, melhorando a estabilidade e a capacidade de realizar curvas, uma vez que aumenta a força com que os pneus fazem na pista. Para que haja o aumento da força normal do pneu, se torna necessária a adição de carga nos pneus. Como a intenção é causar isso sem que precise aumentar a massa do veículo, o *downforce* surge para suprir essa carga, com uma força que vem a partir da interação do corpo com o ar. Com isso, tem-se uma notável melhora no desempenho em pista e a redução nos tempos de volta nos circuitos (KATZ, 1995). Nas demais seções estes efeitos serão explicados.

2.2 FORÇAS AERODINÂMICAS

Para a compreensão do que são as forças geradas pela interação do ar com a geometria do veículo, é preciso primeiro entender como essas forças são geradas. Quando o carro começa seu movimento em pista, ele inicia o contato de maior intensidade com o fluido em que está imerso, o ar. Com isso, ao aumentar sua velocidade, as forças do ar sobre o carro aumentam exponencialmente, onde as equações que descrevem o movimento mostram a velocidade na ordem de grau 2, como mostram as Equações 1 e 2 (MILIKEN, 1994).

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

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

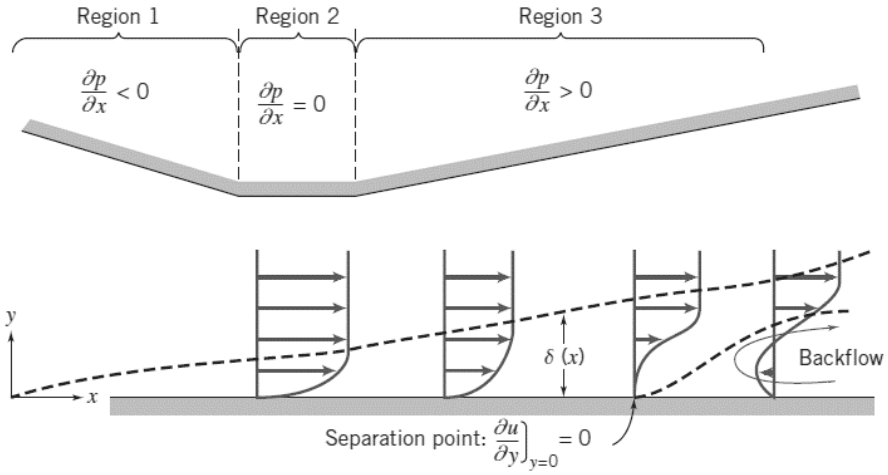
Onde L é a força de sustentação (a *downforce* é obtida multiplicando L por -1), D é a força de arrasto, ρ é a densidade do ar, V é a velocidade do corpo (que pode também ser representado por U ou v), a é a área frontal projetada do corpo, C_L é o coeficiente de sustentação, e C_D é o coeficiente de arrasto.

2.2.1 Arrasto

O arrasto, que simplificadamente é a resistência que o corpo recebe do ar quando está em movimento, é a força de cisalhamento aplicada à superfície na região da camada limite do escoamento (FOX e MCDONALD, 2004). A Figura 1 ilustra o que ocorre durante o escoamento e como a camada limite recebe o cisalhamento. Podemos descrever os fenômenos que acontecem em um escoamento incompressível e viscoso conforme se segue.

Na Figura 1 é mostrada também a representação de como esse escoamento na região da camada limite se desenvolve, e como a pressão aerodinâmica influencia o comportamento do fluido durante o desenvolvimento desse escoamento.

Figura 1 – Perfis de velocidade para diferentes regiões da camada limite.



Fonte: FOX e MCDONALD (2004).

Ao atingir o gradiente de pressão positivo, o fluido inicia o processo de descolamento da superfície, causando o aparecimento de turbulência, ou *backflow*. É possível observar esse fenômeno na saída do escoamento. O ponto de separação representado na Figura se dá quando $\frac{du}{dy} = 0$ para y = 0, onde y é a altura relativa da camada limite do escoamento (FOX e MCDONALD, 2004). Quanto y = 0, temos o ponto de contato do ar com a superfície, onde teremos a velocidade igual a zero devido à condição de não escorregamento nessa superfície e a força de cisalhamento atuando no corpo com a maior intensidade. Os perfis de velocidade mostrados na

Figura 1 mostra que, conforme y tende a zero, a velocidade do escoamento diminui até chegar a zero na superfície. Isso se dá pela crescente força de cisalhamento entre o ar e a superfície em que o escoamento percorre.

Aplicando essa resistência do ar à carros de passeio, é possível afirmar que quanto maior for o arrasto, maior será o consumo de combustível devido a maior dificuldade de projetar o carro para frente. Com isso, a otimização da geometria dos carros é fundamental durante o projeto para que haja o menor consumo possível no dia a dia.

Ao falarmos sobre a otimização de uma geometria a fim de suavizar os efeitos que o ar exerce sobre o corpo, os parâmetros da Equação do Arrasto (Equação 2) ajudam na compreensão: ρ, a densidade do ar, não pode ser alterado em condições normais; A, a área frontal projetada no carro pode ser alterada mas tem a limitação de espaço interno para conforto interno; V varia conforme o carro está em movimento; nos resta otimizar ao máximo o coeficiente de arrasto, C_D, que pode ser reduzido ao otimizar o perfil do veículo.

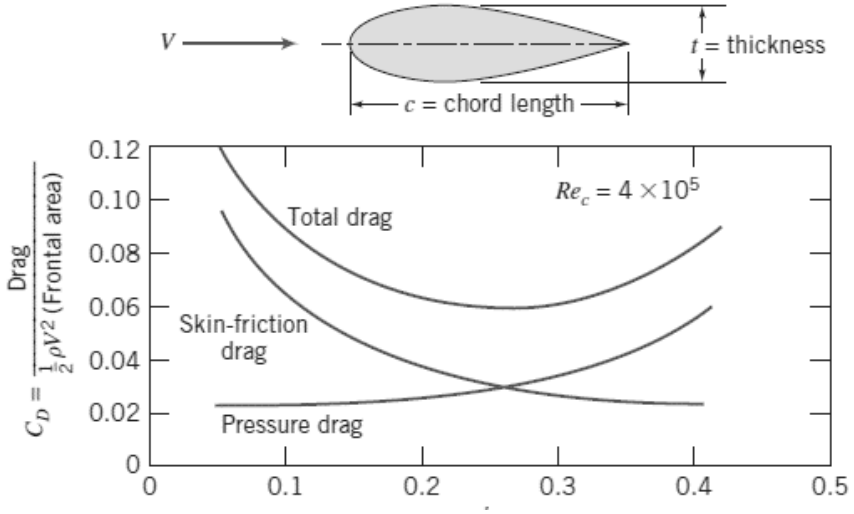
Devido a convergência das linhas de fluxo que percorrem a geometria do carro na região traseira, essas linhas de fluxo vão divergir, fazendo com que a velocidade diminua. Assim, com essa redução de velocidade, a pressão será aumentada, como mostrado na equação de Bernoulli, que relaciona pressão e velocidade em escoamentos livres (Equação 3).

Com isso, tem-se inicialmente um gradiente de pressão adverso na parte traseira do corpo, implicando em uma separação da camada limite e uma região de baixa pressão, aumentando o arrasto. É possível reduzir o arrasto em um corpo fazendo com que seu perfil seja mais cônico, como por exemplo modificando o perfil de uma esfera para que fique similar a um “perfil de gota d’água”, termo usado frequentemente quando comenta-se sobre otimização de perfis aerodinâmicos. Esse tipo de perfil pode ser observado na Figura 2 (FOX e MCDONALD, 2004).

Esse formato de gota reduz o gradiente de pressão adversa e faz com que a região de turbulência seja menor, reduzindo a força de arrasto. Entretanto, fazendo essa alteração no perfil do corpo, aumentamos a área superficial, aumentando consequentemente o arrasto por fricção. Na prática, há um perfil cônico que é o mais otimizado, em que o arrasto total (a soma do arrasto por pressão aerodinâmica e arrasto por fricção) é mínimo para essa geometria (KATZ, 1995).

O gradiente de pressão ao redor do perfil de gota é menos severo do que ao redor de um perfil de seção circular por exemplo. O *trade-off* entre o arrasto de pressão e o arrasto de fricção para o caso é mostrado na Figura 2, onde foi testado o escoamento com o número de Reynolds no valor de $Re_c = 4x10^5$, valor de referência para aeronaves. Quando é calculada a diferença entre os coeficientes de arrasto no exemplo citado, onde temos para o perfil de gota o coeficiente C_D = 0,06 aproximadamente, e a razão entre a espessura da asa e sua corda no valor de t/c =0,25, é possível observar que o C_D do perfil de gota é cerca de 20% menor do que o C_D do perfil de seção circular de mesma espessura (FOX e MCDONALD, 2004).

Figura 2 – Exemplo de perfil de asa em formato de “gota d’água” e a influência aerodinâmica.



Fonte: FOX e MCDONALD (2004)

Ao identificar as principais fontes de arrasto como um todo em um veículo em pista, pode-se resumir em quatro fatores de influência. Os fatores e a quantidade estimada que cada um desses fatores influencia no carro em pista estão presentes na Tabela 1.

Tabela 1 – Estimativa das contribuições no arrasto aerodinâmico de um veículo em pista.

Fator	ΔC_D
Atrito pela rugosidade (fricção)	0,04 a 0,05
Arrasto de resfriamento	0,00 a 0,06
Fluxo interno, ventilação	0,00 a 0,05
Separação do fluxo de ar no corpo	0,00 a 0,45
Arrasto pela indução de *downforce*	0,00 a 0,60

Fonte: KATZ (1995)

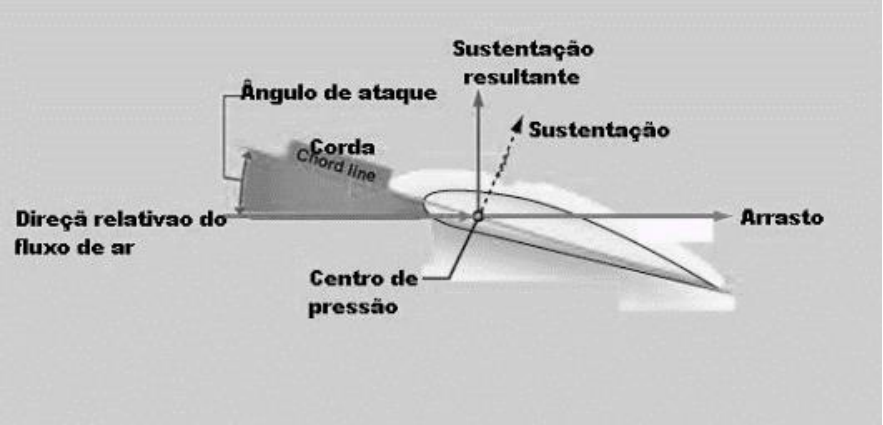
Analisando a Tabela 1, pode-se afirmar que as maiores quantidades de arrasto aerodinâmico são devido à geometria do veículo (o que enfatiza a necessidade de otimização da geometria) e pelo trade-off com a indução de downforce.

2.2.2 Sustentação e *Downforce*

A sustentação é a força que surge a partir da interação de um corpo e o ar, direcionada para cima, e que pode ser empregada para fazer uma aeronave voar, por exemplo. Ela recebe esse nome justamente porque é a responsável por manter um avião voando quando este apresenta uma velocidade adequada para tal. A junção dos motores orientados para o movimento horizontal com as asas, orientadas para direcionar o movimento para cima, fazem com que a aeronave consiga realizar o voo.

Na Figura 3 está exemplificado como um perfil de asa atua quando as condições são atendidas para o voo. O empuxo gerado pelas turbinas do avião junto à sustentação que um perfil de asa adequado, a partir do momento em que atinge uma certa velocidade (a depender do ângulo de inclinação da asa, peso da aeronave e o arrasto a ser vencido), consegue alçar voo e se manter em movimento (ANDERSON, 2016).

Figura 3 – Forças que agem em um perfil de asa e seus elementos.

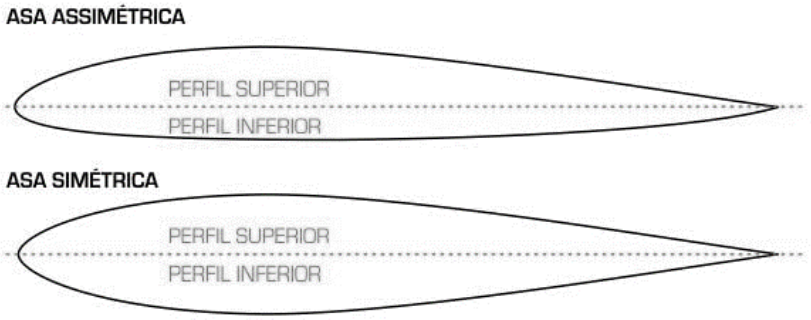


Fonte: FAA (2012).

Na literatura, existem duas principais teorias que explicam a sustentação, que são Bernoulli e Coanda, sendo que a segunda teoria complementa a primeira. A fim de explicar mais nitidamente os fenômenos que ocorrem nesse processo, ambas as teorias serão usadas.

É importante lembrar que os perfis de asa que consegue gerar esse tipo de sustentação aerodinâmica precisam ter assimetria entre a parte inferior e a superior de seu perfil (intradorso e extradorso), assim como representado na Figura 4, que compara com um perfil simétrico que não gera a sustentação.

Figura 4 – Comparação entre perfis de asa com e sem simetria.



Fonte: VIANA (2015),

2.2.2.1 Equação de Bernoulli

A equação de Bernoulli vem a partir da integração da equação de Euler para escoamentos invíscidos e incompressíveis, uma vez que a teoria desenvolvida por Euler apresentava simplificações matemáticas que tinha dificuldades em soluções para problemas não tão básicos de escoamento.

De modo simplificado, a equação de Bernoulli está representada na Equação 3. As restrições para a aplicação da equação são: regime permanente; escoamento incompressível; sem atrito; escoamento ao longo das linhas de fluxo.

$$P + \rho.g.h + \frac{1}{2}\rho.V^2 = constante \quad (3)$$

Em resumo, a teoria de Bernoulli diz que o gradiente de pressão (pressão superior menor que a pressão inferior) causada pela diferença entre as velocidades do ar na parte superior (maior velocidade) e inferior (menor velocidade) do perfil de asa gera uma força ascendente em relação à corda do perfil. Essa força ascendente que resulta do gradiente de pressão é chamada de sustentação (ANDERSON, 2016).

2.2.2.2 Efeito Coanda

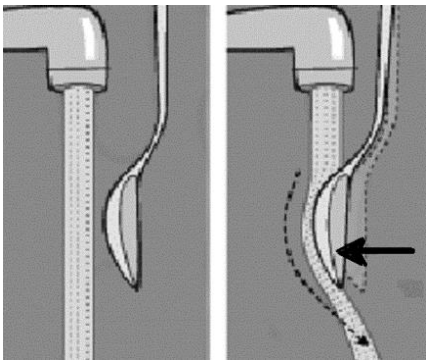
De forma semelhante, temos outra teoria que explica como essa força de sustentação surge e como funciona em corpos interagindo com fluidos. O Efeito Coanda diz que um fluido, ao escoar na superfície de um objeto côncavo, tende a seguir a geometria em que escoa até descolar desta.

O fluido “adere” à superfície curva em que está em contato, seguindo sua geometria durante todo o escoamento, e quando finalmente “descola” da superfície, é possível observar a 3ª lei de Newton com a ação e reação de mesma intensidade e sentido oposto: ao descolar da superfície côncava, o fluido sai da superfície da geometria exercendo uma força no modelo da 2ª lei de Newton. (Equação 4) (HALLIDAY, 2012).

$$F = m.a \quad (4)$$

Com isso, a reação da superfície é ter uma força de mesma intensidade que a do fluido, porém orientada para o outro sentido. Esse fenômeno pode ser observado com um simples experimento caseiro, que consiste em posicionar uma colher de plástico paralela à um escoamento de água saindo de uma torneira aberta. Ao colocarmos a colher em contato com a água escoando, observamos que a água segue o caminho da superfície curva da colher e “descola” da colher em uma direção. Ao sair da superfície, observamos que a colher começa a sofrer uma força na direção oposta da curvatura, e se movimenta para essa direção. A Figura 5 mostra como o escoamento e a força se comportam sob o Efeito Coanda (WAC, 2021).

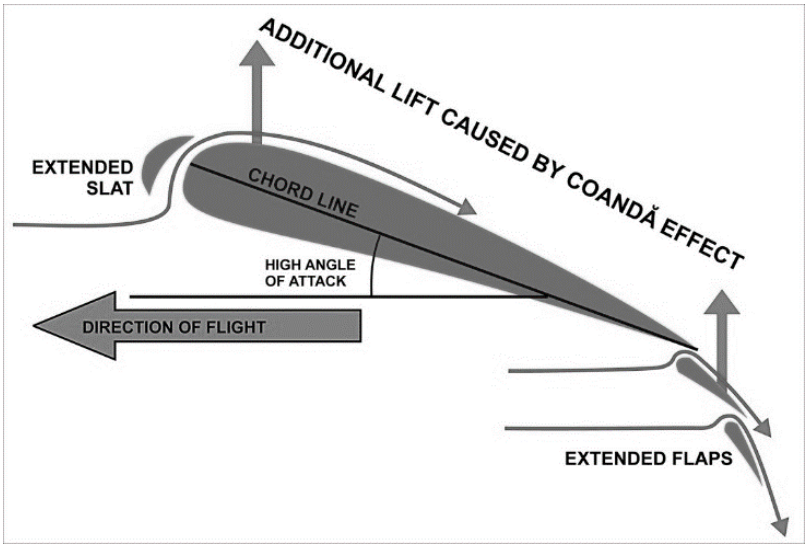
Figura 5 – Experimento caseiro para explicar o Efeito Coanda usando uma colher de cozinha.



Fonte: WAC (2021).

O mesmo efeito pode ser observado ao analisar o escoamento de ar agindo em um perfil de asa: ao percorrer a parte superior da superfície da asa, o escoamento de ar “descola” na parte traseira do perfil, com direcionada para baixo. Com isso, há uma força contrária a esse fluido saindo do perfil, orientada para cima. Portanto, devido ao Efeito Coanda, tem-se essa sustentação adicional agindo no perfil de asa em questão (CARDOSO, 2017).

Figura 6 – Esquema de um perfil de asa sob Efeito Coanda e as forças aerodinâmicas.



Fonte: CARDOSO (2017).

2.2.3 Downforce

Tendo em vista os carros de alto desempenho e a preferência por maior estabilidade em pista, o arrasto se torna secundário uma vez que é priorizada a geração de *downforce*, a fim de obter aumento da dirigibilidade. Essa maior estabilidade é sentida principalmente em curvas, possibilitando o veículo a realizá-las com maior velocidade.

A *downforce* é a força de sustentação negativa, induzida a partir da interação do ar com o carro em movimento. Pode-se obter essa força geralmente usando um perfil de asa que gera sustentação, como por exemplo perfis usados na aeronáutica, e invertê-los de posição, a fim de direcionar essa sustentação para baixo (KATZ, 1995).

Com essa força direcionada para o solo, aumenta-se a aderência dos pneus na pista de maneira otimizada: ao invés de aumentar essa aderência por meio da adição de massa ao veículo, obtém-se isso a partir do uso de dispositivos aerodinâmicos, como por exemplo aerofólios e asas.

Os dispositivos aerodinâmicos possuem grande influência para o aumento dessa aderência do carro em pista, uma vez que, mesmo tendo sido otimizado, o formato de um veículo (desconsiderando a presença de dispositivos aerodinâmicos para gerar *downforce*) tende a gerar sustenção positiva – ou *lift* – em condições

normais. Isso se da pelo fato de ser difícil o direcionamento dessa força de sustenção para baixo, que geralmente é possível devido ao uso dos dispositivos corretos.

Na Tabela 2, reuniu-se diversos modelos de veículos conhecidos e seus respectivos coeficientes de arrasto e *lift* para exemplificar como o uso dos devidos dispositivos e otimização da geometria do carro influenciam na redução de arrasto e aumento da *downforce*. Os valores de C_L negativos mostram a sustentação negativa, ou seja, a *downforce* do veículo.

Tabela 2 – Coeficientes de *Lift* e arrasto para alguns veículos.

Veículo	Tipo	C_D	C_L
Carro de passeio	Sedan	0,44 a 0,47	0,36 a 0,44
Fórmula SAE	Sem pacote aerodinâmico	0,40 a 0,50	0,05 a - 0,04
Fórmula SAE	Com pacote aerodinâmico completo	0,90 a 1,12	-1,10 a - 2,75
Carro de corrida	*Enclosed wheel*	0,67 a 1,11	- 3,33 a - 4,80

Fonte: Próprio autor e KATZ (1995).

Pela Tabela 2, pode-se observar alguns fenômenos descritos anteriormente: em carros de passeio Sedan, temos um baixo intermediário de C_D devido ao seu formato, e alto valor de C_L com geração de *lift*, devido à ausência de dispositivos aerodinâmicos; em carros esportivos, com a geometria otimizada, temos um menor valor de C_D por causa da otimização de sua geometria, e valores de C_L desprezíveis; já em carros de corrida, temos o *trade-off* entre arrasto e *downforce* bem nítidos, com altos valores de C_D e valores negativos de C_L, que mostram a grande quantidade de *downforce* gerada, devido à presença de dispositivos aerodinâmicos.

Dentre os fatores que mais influenciam na geração de *downforce* em um veículo, pode-se destacar 3 principais fatores. Esses fatores e seus respectivos valores de influência estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Estimativa das contribuições no *lift/downforce* de um veículo em pista.

Fator	ΔC_L
Corpo do veículo (geometria)	0,35 a (-0,10)
Asas	0,00 a (-2,00)
Interação corpo/asas	0,00 a (-2,00)

Fonte: KATZ (1995).

Dessa forma, a partir dos valores da Tabela 3 e observando a Tabela 2, é possível afirmar que a adição de dispositivo aerodinâmico mais lógica seria a implementação de asas (invertidas) no veículo a fim de gerar a maior quantidade de *downforce*. As asas podem tanto levantar aeronaves quanto “colar” carros no chão, aumentando a estabilidade em pista. A quantidade de *downforce* gerada por asas podem chegar até a uma tonelada para veículos de alta performance acima de 200 km/h.

Em um veículo de Fórmula SAE, mesmo não atingindo altas velocidades, os dispositivos aerodinâmicos conseguem exercer considerável influência em seu desempenho, assim como será discutido nas demais seções.

Há, porém, outro tipo de dispositivo aerodinâmico que consegue gerar *downforce* de modo que não aumente o coeficiente de arrasto do veículo, que é chamado de sob assoalho, ou *undertray*, que funciona semelhante a um tubo de Venturi (KATZ, 1995), que será detalhado na seção 2.6.

De modo simplificado, o *undertray* é um tipo de assoalho que é posicionado embaixo do assoalho padrão do veículo, e possui o formato de tubo de Venturi cortado ao meio longitudinalmente, como mostra a Figura 7.

Figura 7 –*Undertray* de um carro de Fórmula SAE, com foco em seu difusor.

Fonte: Acervo do próprio autor.

De forma análoga ao tubo de Venturi, o *undertray* consegue induzir a *downforce* no carro utilizando a diferença de pressão entre a parte superior e inferior do dispositivo. Usando a geometria inferior para “estrangular” o ar que passa embaixo do *undertray*, ocorre maior aceleração nessa região, fazendo com que a pressão nessa região seja menor. Assim, com maior velocidade, consequentemente tem-se uma pressão menor.

Analogamente à sustentação induzida pela diferença de pressão em uma asa, temos a *downforce* aparecendo na região de estrangulamento localizada embaixo do carro. Visto que a implementação desse tipo de sub assoalho não aumenta significativamente o arrasto, esse dispositivo aerodinâmico possui melhor custo/benefício em comparação às asas, porém a quantidade de *downforce* gerada é menor (KATZ, 1995).

2.3 PROJETO E VALIDAÇÃO

Durante a fase de projeto de um veículo, o meio mais eficaz para obter os parâmetros de aerodinâmica, como por exemplo o valor do coeficiente de arrasto (C_D) e de *lift/downforce* (C_L) do carro todo, ou somente de um dispositivo isolado, é o uso de *softwares* que consigam simular um modelo 3D do carro imerso em ar nas condições de pista, os chamados *softwares* de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), ou Dinâmica de Fluidos Computacional. Mesmo que não seja uma forma de validação do projeto de aerodinâmica, é um bom indicador da eficiência desses dispositivos e da influência destes no carro como um todo. Esse método será detalhado na seção 2.3.3.

Quanto às possíveis maneiras de realizar a validação dos parâmetros aerodinâmicos de um veículo, pode-se dividir em dois tipos: as validações em pista e fora dela. O ideal, a fim de obter os parâmetros da maneira mais real possível, é realizar os testes nas mesmas condições de uma corrida, que seria o uso de validações em pista. Tendo em vista a dificuldade de implementar as validações em pista, uma vez que há grande dificuldade de controlar as condições envolvidas, geralmente os testes fora de pista são mais utilizados.

2.3.1 Validações fora da pista

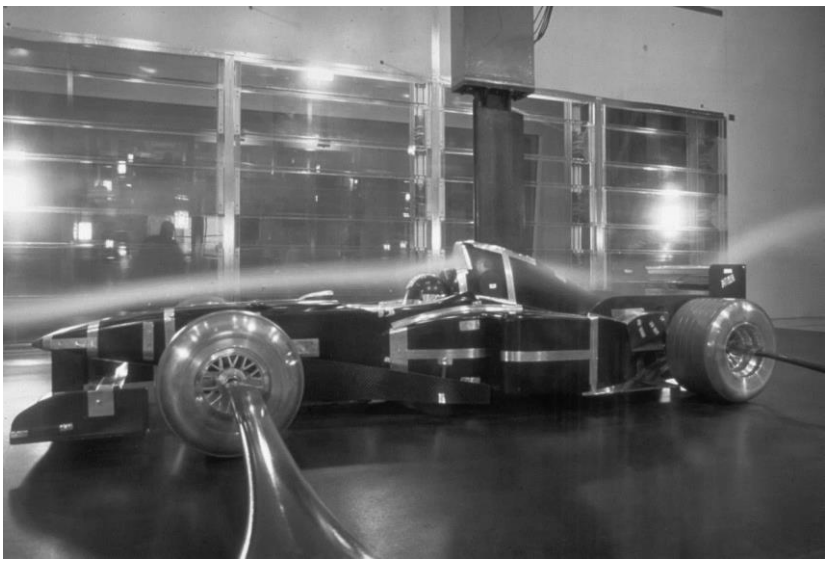
Os testes de um carro em pista são mais difíceis de serem realizados devido à dificuldade de controlar os fatores e variáveis durante a execução desses testes. Assim, surgiram meios de realizar validações da aerodinâmica e seus dispositivos implementados por meio de testes controlados, como por exemplo o uso de túneis de vento.

2.3.1.1 Túnel de Vento

Os testes em túneis de vento possuem a vantagem de ocorrerem em ambientes controlados, porém os testes em escala real são geralmente caros, e modelos para o ensaio podem ainda não ter sido confeccionados ou não estejam disponíveis.

Quanto à modelos em escala reduzida, se não forem devidamente confeccionados em termos de proporcionalidade em relação ao tamanho real, os testes podem não reproduzir exatamente as condições do modelo original, não tendo os resultados condizentes no teste. Além disso, as paredes do túnel e o chão estacionário introduzem problemas adicionais que podem resultar em dados que são substancialmente diferentes dos dados em condições reais de pista (KATZ, 1995).

Figura 8 – Veículo de Fórmula 1 em escala real dentro de um túnel de vento durante escoamento de fumaça.

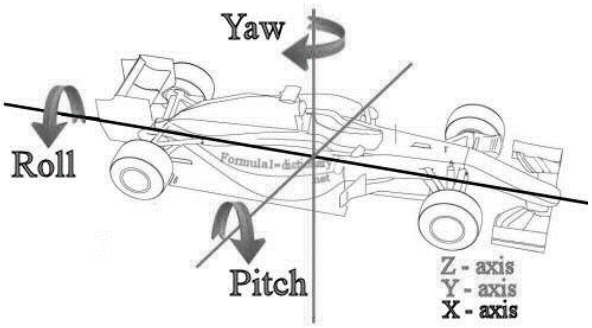


Fonte: ROMAGNA (2023).

Em resumo, o teste em túnel de vento consiste em posicionar o veículo ou seu modelo em escala reduzida no centro de uma sala fechada, e simulação de efeitos de movimento em pista: aplica-se uma corrente de ar que atinja e percorra o carro todo, em condições padrão de temperatura e pressão atmosférica, enquanto o carro permanece parado. Para evitar que o vento lançado ao carro chegue turbulento, coloca-se uma tela de anti-turbulência na frente do ventilador a fim de deixar o fluxo de ar o mais laminar possível, uniformizando o escoamento de ar que chega na superfície do veículo (KATZ, 1995). Junto a isso, há a implementação dos devidos sensores de temperatura, pressão, entre outros, em áreas específicas do carro, a fim de obter os parâmetros desejados.

Dentre os resultados que podem ser obtidos a partir de testes em túnel de vento, pode-se citar os principais sendo as cargas aerodinâmicas – *downforce*, arrasto, forças laterais, e momentos aerodinâmicos – *pitch, yaw,* e *roll,* como exemplificado na Figura 9.

Figura 9 – Momentos aerodinâmicos em um carro de Fórmula 1.



Fonte: F1 Dictionary (2021).

Os principais parâmetros que afetam a performance do veículo são *downforce*, arrasto, a razão entre as duas forças (L/D), e a distribuição da *downforce* entre os eixos dianteiro e traseiro (a relação de 40% no eixo dianteiro e 60% no eixo traseiro é considerada satisfatória) (KATZ, 1995).

As cargas aerodinâmicas geralmente são medidas com o uso de balanças, posicionadas uma em cada roda do carro. Para melhorar a obtenção de dados do veículo, pode-se usar a distribuição de pressão do ar e fumaça para visualizar melhor o escoamento na superfície do veículo. As técnicas utilizadas para obtenção desses dados geralmente são as mesmas usadas em testes em pista, porém são mais fáceis de serem implementadas em testes usando túnel de vento.

2.3.2 Validações em pista

A fim de obter dados mais precisos com as condições reais de circuito, geralmente são realizados os testes em pista. Cada teste tem sua finalidade, sendo mais difícil realizar somente um teste e conseguir todas as informações desejadas. Exemplos disso, que será detalhado nas demais seções, é o uso do Método da Velocidade Constante para obter a força de *downforce* que as molas da suspensão

recebem, e o *Coast Down* para obter a força de arrasto. Há também testes empregados para visualização do escoamento, sendo de cunho qualitativo, não obtendo resultados numéricos, como é o exemplo do teste de fitas ou barbantes.

2.3.2.1 Método da Velocidade Constante

O método da velocidade constante tem como objetivo obter a quantidade de *downforce* no carro a partir da variação do curso dos amortecedores. Para conseguir o resultado sem interferências que não sejam de origem aerodinâmica é preciso que o percurso que o carro fará seja totalmente em linha reta em uma pista sem ondulações, e com pouco vento no momento do teste.

O teste consiste em acelerar o carro até uma dada velocidade e mantê-la constante durante o tempo estipulado para obter a variação dos amortecedores. Sensores que farão a leitura dessa variação do curso dos amortecedores são instalados, a fim de capturar o movimento vindos pela *downforce* que age no carro durante o teste. Para que o teste tenha resultados precisos, é necessário que a velocidade seja relativamente alta, acima de 60 km/h, para que a *downforce* apareça em maior intensidade (KATZ, 1995).

2.3.2.2 *Coast Down*

O teste de *Coast Down* tem como objetivo obter a força de arrasto que atua no carro em pista, por meio do monitoramento da desaceleração que o veículo sofre quando em “movimento livre”.

A realização do teste consiste em acelerar o carro até uma dada velocidade em uma linha reta, e a partir da marcação do tempo, desengatar o carro e deixá-lo desacelerar somente com a resistência do ar e atrito pela rolagem dos pneus até atingir a outra marcação, parando o cronômetro.

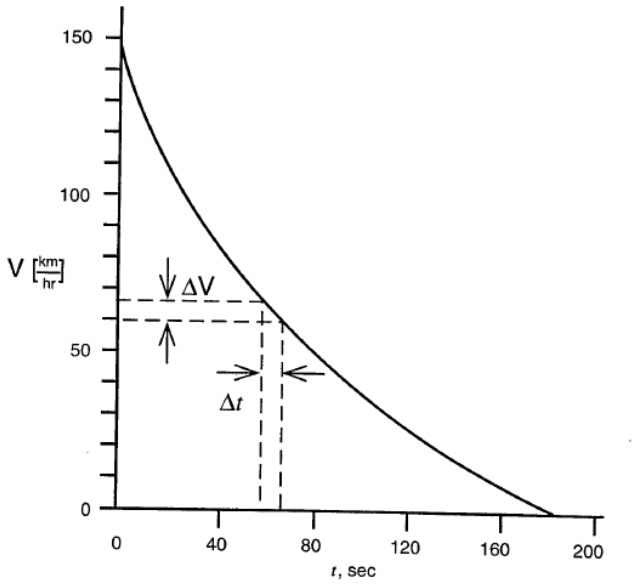
Para que os resultados obtidos sejam somente por interação com o ar, é necessário antes calcular a resistência por rolagem dos pneus que o carro tem, que é constante para quaisquer velocidades. Uma maneira prática de obter essa perda por rolagem seria um teste semelhante ao *Coast Down*, porém em uma velocidade bastante baixa, para que as perdas por aerodinâmica sejam desprezíveis.

Os valores obtidos para a força de arrasto aerodinâmico aplicado no carro podem ser calculados a partir das equações (4) e (5), que relacionam a massa do veículo (m), a variação da velocidade em pista (∆V), o intervalo de tempo (∆t) e a força de arrasto (D) (KATZ, 1995).

$$D = -m\,\frac{\Delta V}{\Delta t} \qquad (5)$$

O gráfico presente na Figura 10 mostra a variação típica de velocidade do veículo versus o intervalo de tempo do teste de *Coast Down*.

Figura 10 – Variação da velocidade versus o tempo do teste



Fonte: KATZ (1995).

2.3.2.3 Testes de visualização de escoamento

Testes que permitem a visualização do escoamento de ar ao redor do carro são amplamente usados a fim de entender como o ar interage com a superfície do veículo, ajudando a saber onde o ar está “descolando” e os vórtices estão sendo gerados. Dessa forma, a visualização do escoamento permite agir de forma local a fim de

minimizar as forças de arrasto, auxiliando na otimização da geometria do carro, como comentado na seção 2.2.1.

Entre os testes de visualização de escoamento, dois são comumente utilizados: o teste com fumaça durante testes em túnel de vento; e o teste com fitas ou barbantes, usado em testes do carro em pista ou também em túnel de vento. Esse tipo de teste geralmente é implementado para ajudar a explicar parte dos resultados obtidos durante os testes em túnel de vento e em pista (KATZ, 1995).

O teste com fitas ou barbantes consiste em revestir a superfície externa do veículo testado com pedaços de barbantes ou fitas paralelas à direção que o ar incide no carro, colando com um adesivo somente a ponta da frente desse pedaço. Dessa forma, quando o ar incidir na superfície do veículo, as linhas de fluxo serão “desenhadas” conforme o movimento do barbante ou fita, permitindo a visualização do comportamento do ar nessa superfície, e facilitando o entendimento que a forma desse escoamento se desenvolve no veículo e ajudando a identificar ponto de descolamento do fluxo de ar (KATZ, 1995).

De forma semelhante, o teste com fumaça em túnel de vento é empregado para auxiliar na visualização do escoamento do ar que incide no veículo, mas de maneira mais eficaz por causa do material usado. A fumaça, por ser um fluido como o ar, mostra com maior eficácia o caminho que o escoamento de ar no carro percorre e onde tem-se os vórtices causado pelo descolamento do ar na superfície (KATZ, 1995). É possível visualizar a fumaça escoando na superfície do veículo durante o teste em túnel de vento na Figura 8.

2.3.3 Métodos Computacionais – CFD

Métodos analíticos são simples para serem aplicados e resultam em predições corretas para problemas particulares investigados. A dificuldade em aplicar essa lógica em aerodinâmica automotiva é devida a grande complexidade das equações de dinâmica de fluidos. As simulações de fluido computacionais usando métodos numéricos surgem para suprir essa dificuldade de aplicar soluções analíticas para esses escoamentos.

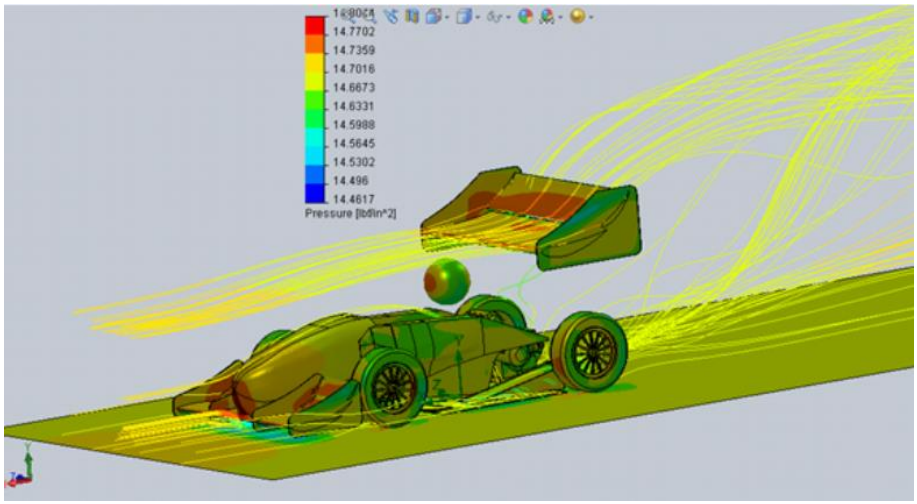
Durante a fase de projetos de um veículo, as únicas maneiras de se obter alguma estimativa sobre o desempenho da geometria em desenvolvimento é a utilização de simulações computacionais ou protótipos que representem o carro de

alguma forma. A utilização de protótipos de escala reduzida em túnel de vento é comentada na seção 1.3.1.1, e o uso de simulações computacionais é hoje amplamente empregada na indústria automotiva pela sua praticidade em representar modelos reais em cálculos numéricos.

O CFD – *Computational Fluid Dynamics* – é usado a partir do modelo 3D desenhado em *softwares* como por exemplo o SolidWorks™, e implementado em simulações fluido computacionais a fim de obter valores estimados dos parâmetros aerodinâmicos, como o C_D e C_L do veículo.

O uso do CFD é útil e amplamente usado pois é possível visualizar todo o escoamento do ar na geometria projetada para o carro sem ter o modelo real construído, o que é mais difícil de ser feito em testes no túnel de vento por exemplo, mas requer bastante processamento do computador usado para a simulação (Duke University Motorsport, 2017). A Figura 11 mostra um exemplo de um modelo de Fórmula SAE em uma simulação de fluxo de ar, com as linhas de fluxo de ar interagindo com os dispositivos aerodinâmicos.

Figura 11 - Exemplo de simulação aerodinâmica computacional do modelo 3D de um veículo de Fórmula SAE.



Fonte: Duke University Motorsport (2017).

Na Figura 11 é mostrado o modelo 3D por inteiro simulando um teste de túnel de vento. A fim de minimizar o tempo de duração de cada simulação, uma vez que

demoram cerca de 20h, como a geometria é simétrica no sentido da incidência de fluxo de ar, geralmente usa-se metade do modelo.

A complexidade para aplicar uma simulação de maneira adequada é alta, com uma quantidade grande de parâmetros a serem configurados, bem como o trabalho de refinar a malha de elementos que constituem o túnel de vento digital.

2.4 AERODINÂMICA E PERFORMANCE DO CARRO

Assim como comentado previamente, as cargas aerodinâmicas provenientes da indução de *downforce* conseguem afetar a dirigibilidade de um veículo, aumentando a estabilidade e a capacidade de realizar curvas. O que ocorre com esse aumento de carga normal ao solo, que será chamada de F_Z, usando como base as coordenadas cartesianas (x,y,z). que tem origem aerodinâmica, é o aumento do contato dos pneus com o solo.

2.4.1 Pneus

Os pneus do veículo são os principais componentes responsáveis por “traduzir” essa carga aerodinâmica em forças que influenciam o carro como um todo, transmitindo os impactos para a dirigibilidade do caro.

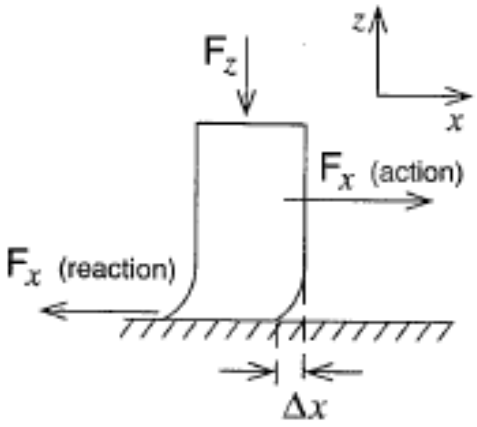
Dessa forma, aumentando-se o contato dos pneus com a pista, o deslizamento desses pneus ocorre de maneira mais eficiente, fazendo com que o carro tenha menor dificuldade de realizar curvas, gerando maior estabilidade e controle do mesmo. Isso é feito com a alteração do *slip* dos pneus, termo utilizado para representar (geralmente em porcentagem) a velocidade relativa que eles têm com solo. O *slip* pode também ser utilizado tanto na longitudinal quanto na lateral (MILIKEN, 1994).

O caso de *slip* longitudinal é usado tanto para aceleração quanto para frenagem. A frenagem é ocasionada da redução da velocidade de rotação relativa entre os pneus e o solo e o surgimento do *slip* das rodas. Esse *slip* das rodas é, portanto, uma medida da velocidade de rotação versus a velocidade do solo. Por exemplo: se as rodas rotacionam sem nenhuma fricção, então o *slip* é de 0% ($V = R\Omega$, onde R é o raio da roda e Ω é a razão de rotação). Quando o pneu desliza sem nenhuma rotação (por exemplo quando está travado), então o *slip* é de 100%. Um *slip* de 15% seria quando a rotação do pneu $R\Omega$ é 15% menor que a velocidade de movimento para frente V (MILIKEN, 1994).

Para baixos valores de *slip* dos pneus, o aumento da força de frenagem é linear; acima de 15% de *slip,* a força axial F_X (força do solo no pneu) diminui com aumento do *slip.* As forças de tração durante a aceleração do veículo são criadas de maneira similar, mas o pneu rotaciona mais rápido que a velocidade do solo; então 100% de *slip* é quando o pneu rotaciona, mas a velocidade para frente é muito inferior (V << RΩ); zero *slip* é então quando a velocidade do pneu é igual a velocidade do solo.

Quando o carro realiza uma curva, a força lateral é criada por um *slip* lateral do pneu, assim como representado na Figura 12. Como resultado desse *slip*, a real direção de deslocamento tem uma diferença de ângulo β da direção de deslocamento, que também tem como resultado o aumento gradual da força lateral ao pneu F_Y. o coeficiente de adesão lateral é a razão entre a força lateral e a normal, e para pequenos valores do ângulo β (menor que 4º) o crescimento da adesão lateral é linear, porém para maiores ângulos, o *slip* do pneu é grande (o veículo pode derrapar). Na prática, um pneu vai operar na faixa de valores de ângulo de *slip* lineares, onde a dirigibilidade se mantém previsível. Em resumo, o veículo não estará fora de controle, e vai virar conforme esperado quando a direção é esterçada (MILIKEN, 1994).

Figura 12– Forças atuantes em um pneu de carro em movimento e sua deformação.



Fonte: KATZ (1995).

Esse conceito resulta na conclusão de que o veículo realizando uma curva tem que manter um ângulo de *slip* (causado pelo esterçamento do volante) em relação à direção de movimento. Para que o carro tenha uma orientação verdadeiramente

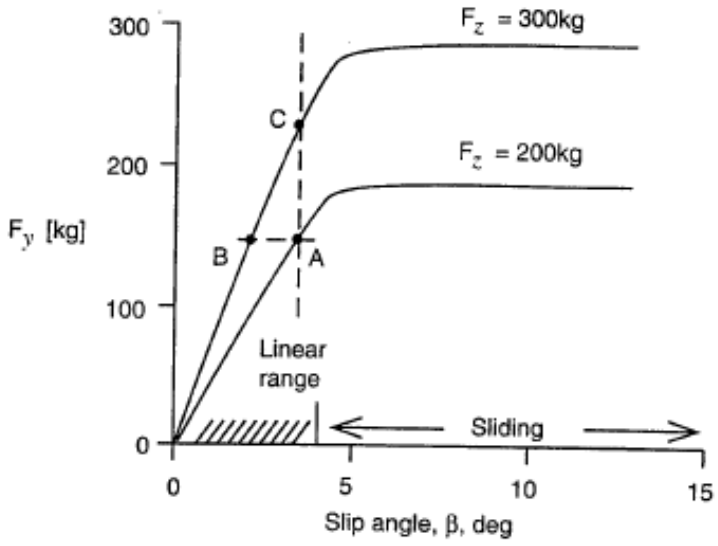
tangencial em relação ao percurso circular, todas as rodas deveriam manter um ângulo de *slip* lateral, e isso só é possível caso todas as quatro rodas possam ser esterçadas (MILIKEN, 1994).

2.4.2 Como a aerodinâmica afeta a dinâmica veicular

2.4.2.1 Desempenho em curvas

A performance geral de um veículo e de seus pneus dependem, dentre outros fatores, da geometria da suspensão, pressão dos pneus, carga na direção normal ao solo, construção do pneu, condições da pista etc. Esses parâmetros são geralmente desenvolvidos com base na hipótese de força normal ao solo F_Z constante. Porém, devido a presença da *downforce*, a carga normal pode variar, assim como mostrado na Figura 13, onde é considerado um aumento de 50% da força normal F_Z devido a presença de *downforce* em um veículo com a massa de 200 kg.

Figura 13– Dependência da força lateral dos pneus na força normal versus o ângulo de *slip* lateral.



Fonte: KATZ (1995).

No gráfico, o ponto A representa a força lateral durante a curva sem presença da *downforce* e em certas condições de pneu e pista, enquanto o ponto B representa

as mesmas condições, porém com presença de 50% de carga normal a mais devido a *downforce,* com a mesma quantidade de força lateral. Ao analisar o gráfico, é possível notar que no ponto B tem-se 50% menos *slip* lateral. Isso quer dizer que a presença dessa quantidade de *downforce* preserva os pneus (diminui seu desgaste) e reduz sua temperatura devido à fricção (*slip*).

De outro modo, se para a máxima performance a maior força possível é desejada, então o ponto C representa uma condição com o mesmo valor de *slip* dos pneus do que o ponto A, porém devido a presença de carga aerodinâmica (*downforce*) o carro realiza a curva com maior velocidade, ou freia com maior intensidade quando é considerado o *slip* longitudinal. Conclui-se então que com a presença de *downforce,* é melhorada a capacidade de realizar curvas mais rápidas e de frear com maior eficiência. Esse pequeno aumento na tração do veículo, em alta velocidade, representa também o possível aumento da potência do motor devido ao efeito de indução de ar na entrada do coletor da admissão desse motor (*air intake*) (KATZ, 1995).

2.4.2.2 Distribuição de carga longitudinal

As forças aerodinâmicas também afetam a distribuição de cargas entre os eixos durante a aceleração e frenagem, e é possível visualizar os efeitos no plano longitudinal do veículo. Devido a inércia, durante a aceleração do veículo, a força que atua no eixo traseiro aumenta e a força que atual no eixo dianteiro diminui; do mesmo modo, ao frear o veículo, a força que atua no eixo dianteiro aumenta, enquanto no eixo traseiro, ela diminui. Essa alteração da distribuição de carga nos eixos é responsável por criar o movimento de *pitch* no carro, empinando levemente a dianteira ou traseira, dependendo da aceleração ou frenagem do veículo. Quando em altas velocidades, devido à *downforce*, as cargas aerodinâmicas em cada eixo devem ser maiores do que o efeito de transferência de carga durante a aceleração ou frenagem, minimizando o efeito de *pitch* no veículo durante esses movimentos (KATZ, 1995). Há a necessidade de projetar a distribuição que as cargas aerodinâmicas têm no veículo, uma vez que a depender da posição do centro de gravidade (chamado de CG), se a distribuição dessas cargas estiver errada, pode-se se gerar efeitos desastrosos, como por exemplo o mostrado na Figura 18, onde a *downforce* no eixo traseiro é muito

maior, causando *pitch* excessivo no momento de aceleração, onde a força inercial no eixo traseiro é maior.

2.4.2.3 Estabilidade lateral

Quando adicionados os efeitos aerodinâmicos em altas velocidades, muitos carros de passageiros desenvolvem *lift* traseiro e *downforce* dianteiro, que podem resultar em condições de instabilidade lateral. Isso é comumente corrigido em carros de passeio com a adição de *downforce* no eixo traseiro, usando pequenos aerofólios ou asas traseiras. Em carros de alta performance, é preciso lembrar que eles operam próximos ao limite do coeficiente de fricção máximo, então qualquer perturbação no balanço entre as forças dianteiras e traseiras pode causar a perda de controle do veículo. Isso pode ser ocasionado principalmente em curvas de alta velocidade, onde a perda de *downforce* no eixo traseiro pode gerar *oversteer* (chamado popularmente de “sair de traseira”), podendo fazer com que o veículo gire; e a perda similar de *downforce* no eixo dianteiro pode ocasionar o *understeer* (popularmente conhecido como “sair de dianteira”), que pode fazer com que o veículo não vire o suficiente em uma curva, podendo sair da pista (KATZ, 1995).

É possível notar que o *roll* do veículo (rotação no eixo x da Figura 9) e transferência de carga lateral são presentes durante uma curva, e influenciam bastante na dirigibilidade do carro. A diferença da força normal entre os pneus esquerdo e direito, bem como o *compliance* da suspensão (como a suspensão se comporta) devido ao movimento de *roll,* geralmente tem um forte efeito na estabilidade do veículo.

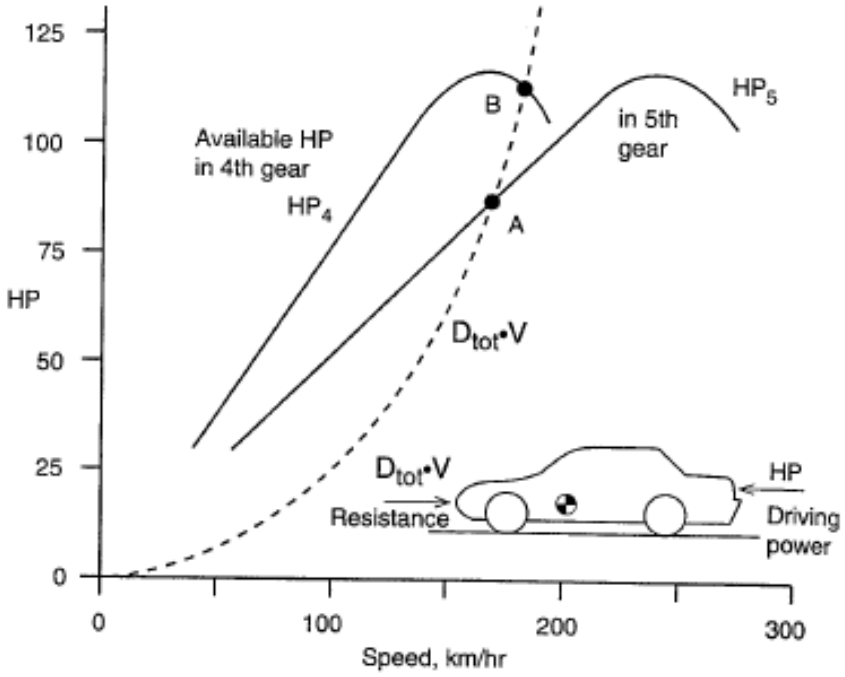
2.4.2.4 Velocidade máxima

A velocidade máxima do veículo é alcançada quando o torque máximo nas rodas em uma dada velocidade se iguala à força de arrasto aerodinâmico somada a força de resistência à rolagem dos pneus. Geralmente, a potência máxima do motor é dada em cavalos de potência (CV ou HP, em inglês) e cresce conforme a rotação do motor (em RPM) aumenta. Por outro lado, a resistência a esse movimento, chamada de D_{TOT}, que é a soma da força de resistência do ar, o arrasto, e a resistência a rolagem dos pneus, cresce exponencialmente, e a potência dessa força de resistência total é dada pela relação de D_{TOT} multiplicada pela velocidade. Como a resistência a

rolagem é constante, em altas velocidades a maior parte da força de resistência é devido ao arrasto aerodinâmico (KATZ, 1995).

A relação entre a potência dada pelo motor nas marchas 4 e 5, bem como a potência de resistência proveniente do ar e rolagem em função da velocidade estão mostradas na Figura 14. Nas interseções da curva das forças de resistência e as duas curvas de potência do motor, representada pelos pontos A e B, são os pontos que a potência vinda do motor se iguala à potência causada pela força de resistência do ar e de rolagem dos pneus. Ao comparar as duas curvas do motor, é possível afirmar que a curva da potência na quarta marcha tem maior potência em menores velocidades, enquanto a curva na quinta marcha mostra menor potência, porém maior economia de combustível.

Figura 14 – Relação entre a potência do motor e as forças de resistência



Fonte: KATZ (1995).

É importante comentar também sobre a influência que a aerodinâmica tem na frenagem de um veículo. Em altas velocidades, grandes quantidades de *downforce* podem aumentar e até dobrar a força normal nos pneus, aumentando consideravelmente a performance dos freios. É estimado que seja possível um carro ter até 2g de aceleração quando há uma frenagem a 300 km/h. Um exemplo sobre a influência da aerodinâmica ao frear um veículo é a redução de até 30m de distância

necessária para frear completamente quando há o aumento do coeficiente de *lift* negativo em C_L= -2,00 para o caso de um carro à 250 km/h (inicialmente tendo C_L = 0).

Outro ponto importante é ressaltar o aumento da velocidade máxima em curvas, que é aumentada com a *downforce*, assim como comentado na seção 2.4.2.1. As forças que agem no veículo são as forças dos pneus, que aumentam com a adição de carga aerodinâmica, e as forças centrífugas, que aumentam com a velocidade em curva num dado raio. Com o aumento para o C_L= -2,00, é possível aumentar em até 100 km/h a velocidade em curva de um veículo inicialmente com C_L = 0 e à 150 km/h (para o raio de curva de 200 e coeficiente de fricção dos pneus μ = 1,00) (KATZ, 1995).

2.4.2.5 Arrasto e *Lift* no veículo

Tendo em vista que quando o *lift* de uma asa aumenta, o arrasto cresce também. Esse arrasto induzido aumenta com o quadrado do *lift*, como mostrado na Equação 6.

$$C_{Di} = \left(\frac{1}{\pi AR}\right).{C_L}^2 \tag{6}$$

Onde C_{Di} é o coeficiente de arrasto induzido e AR é a razão de aspecto do veículo.

A fim de avaliar o efeito resultante do aumento de *downforce* no veículo, pode-se chegar a uma correlação semelhante à mostrada anteriormente para o arrasto, presente na Equação 7.

$$C_D = k(C_L - C_{L0})^2 + C_{D0} \tag{7}$$

Onde k é uma constante que nesse caso assumirá o valor de k = 0,04, C_{D0} é o coeficiente de arrasto mínimo (sem dispositivos aerodinâmicos), e C_{L0} é o coeficiente de *lift* sem esses mesmos dispositivos.

Os efeitos da aerodinâmica nos tempos de volta em uma pista podem ser calculados incorporando a Equação 7 em um *software* de simulação de dinâmica veicular, junto às condições de pista e de pneus (KATZ, 1995).

2.5 Aerodinâmica do carro completo

2.5.1 Geometria da superfície

Visto que o sucesso em uma corrida é representado em função do tempo de volta, é possível identificar a competência ou não do design do veículo também em função do tempo. Muitas vezes, algumas alterações pontuais podem resultar em drásticas reduções de tempo de volta em um circuito, e na aerodinâmica isso ocorre com certa frequência. Desde uma pequena alteração no ângulo de saída da superfície traseira à alteração da corda de um perfil de asa, vemos grandes resultados em termos de tempo.

Assim como comentado previamente na seção 2.2.1, a redução do arrasto geralmente é obtida por meio da otimização da geometria do carro como um todo, então a implementação de dispositivos aerodinâmicos necessita de um projeto que não prejudique os demais dispositivos, principalmente na questão aerodinâmica.

Um exemplo é o fato de que um carro *hatch* tem um maior coeficiente de arrasto do que um carro *sedan* ou *fastback*, porém a implementação de um pequeno aerofólio na traseira do veículo *hatch* reduz o arrasto devido ao descolamento do fluxo de ar na superfície ter sido modificado (KATZ, 1995).

Quanto à superfície inferior do carro, existem também algumas alterações que podem melhorar o escoamento e otimizar a interação com o ar. Se o ângulo traseiro debaixo do carro for alterado para um ângulo moderado de, por exemplo, $\theta = 15^{o}$, há o aumento sensível na *downforce* com pouco aumento do arrasto induzido.

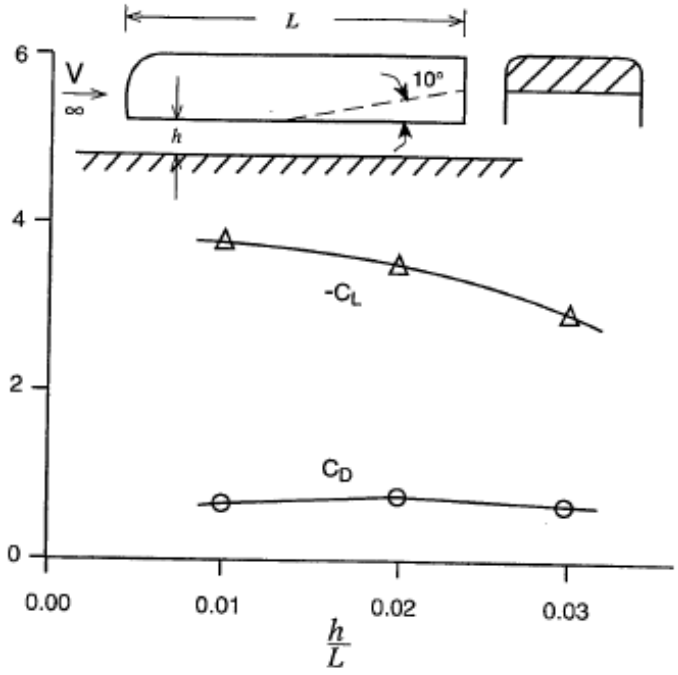
Porém, há uma maneira intensamente mais eficiente de modificar a superfície inferior do veículo, aumentando bastante a quantidade de *downforce* e com baixa quantidade de arrasto: a implementação de um *undertray,* ou sob assoalho. Esse dispositivo pode também ser chamado de Venturi, por usar os efeitos do tubo de Venturi, porém com alterações.

2.5.2 Posição em relação ao solo

Outro fator levado em consideração é a distância do veículo ao solo. A fim de melhorar os efeitos do ar com a superfície do carro, a proximidade dele com o chão pode reduzir o arrasto aerodinâmico, bem como otimizar e aumentar a *downforce*.

Essa proximidade é geralmente representada pela relação h/l, onde h é a distância ao solo, enquanto l é o comprimento do carro. A relação que o ângulo inferior de saída e a razão entre a distância ao solo e o comprimento do carro estão presentes no gráfico da Figura 15.

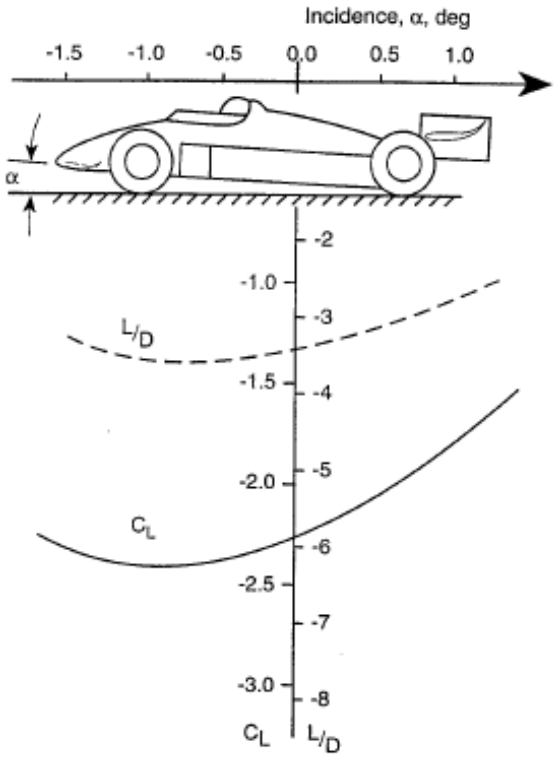
Figura 15 – Variação dos coeficientes de *lift* e arrasto versus a distância do carro até o solo.



Fonte: (KATZ, 1995).

Há também o fato de ângulo de “ataque” que o carro tem em relação ao solo, que é o ângulo entre o solo e o carro, de modo que este fique com o bico apontado para cima ou para baixo, a depender do que foi projetado. Esse ângulo, chamado de α, que funciona semelhante ao ângulo de ataque de um perfil de asa por exemplo, pode alterar tanto a *downforce* quanto o arrasto aerodinâmico, bem como mostrado na Figura 16, onde é relacionado o ângulo de inclinação do veículo com a razão entre quantidade de *lift* negativo (*downforce*) e arrasto, bem como o coeficiente de *lift* C_L.

Figura 16– Inclinação do veículo α e a relação com as forças aerodinâmicas.



Fonte: KATZ (1995).

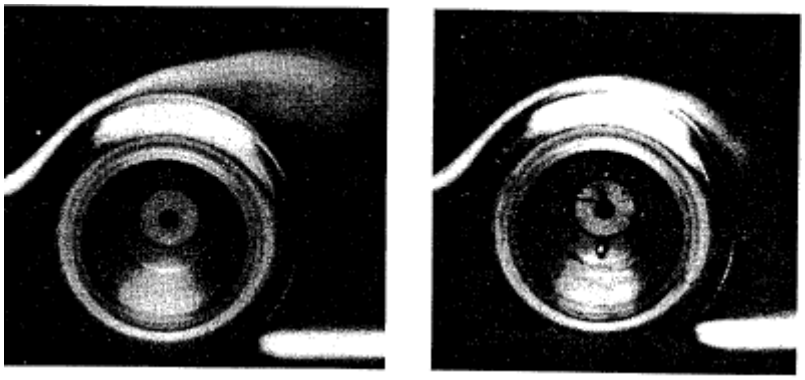
2.5.3 Fluxo de ar nas rodas

As rodas, principalmente em veículos chamados *open wheel*, como por exemplos na Fórmula 1 que as rodas são externas ao carro, são os elementos que possuem a maior influência da aerodinâmica. O fluxo de ar ao redor das rodas é altamente influenciado pela rotação delas, como é possível notar principalmente quando usada a fumaça em túnel de vento para visualizar esse escoamento. Dessa forma, um dos aspectos mais importantes da aerodinâmica das rodas é entender como a influência nos coeficientes aerodinâmicos.

Quando rotacionando em contato com o solo, o fluxo ao redor das rodas forma uma região turbulenta na saída, com o maior descolamento das linhas de fluxo, aumentando intensamente o arrasto conforme rotaciona. Esse ponto de contato com o solo gera também um ponto de estagnação do ar, gerando um *lift* nesse contato. Ao analisar o escoamento do ar no carro como um todo, é possível notar que essa região de turbulência gerada atrás da roda devido ao descolamento intenso do fluxo de ar resulta em maior *lift* no carro todo (KATZ, 1995). É importante ressaltar que como a rotação das rodas é permanente enquanto o carro estiver em movimento, essa

geração de *lift* também será constante, bem como o aumento do arrasto induzido, potencializando esses efeitos

Figura 17 – Visualização do escoamento ao redor de uma roda em rotação em comparação a uma roda em repouso.



Fonte: KATZ (1995).

Já para veículos que possuem as rodas “encapsuladas” em sua carenagem, como é o caso de carros de passeio por exemplo, é usado o termo *enclosed wheels*, e observa-se que os efeitos aerodinâmicos mencionados para a rotação deixam de influenciar com tamanha intensidade. Diferente do observado na visualização da Figura 17 para *open wheels*, a visualização para carros *enclosed wheels* é mais difícil, podendo ser compreendida como uma recirculação do ar ao redor das rodas, podendo ser direcionadas para o resfriamento de componentes como disco de freios por exemplo, ou para debaixo do veículo, a fim de gerar maior quantidade de *downforce* (KATZ, 1995).

Tendo em vista os efeitos da aerodinâmica tanto para carros com rodas externas quanto internas, pode-se observar que os veículos *open wheel* sofrem com maior intensidade os efeitos do arrasto, e a maior parte do coeficiente de arrasto do carro como um todo vem do arrasto nas rodas.

2.6 Dispositivos aerodinâmicos

A partir da análise dos fenômenos aerodinâmicos que ocorrem quando o carro está em movimento, pode-se pensar em alguns dispositivos aerodinâmicos que são comumente usados em provas de automobilismo, como por exemplo as asas e aerofólios. O intuito do uso desses dispositivos é geralmente o aumento da *downforce*

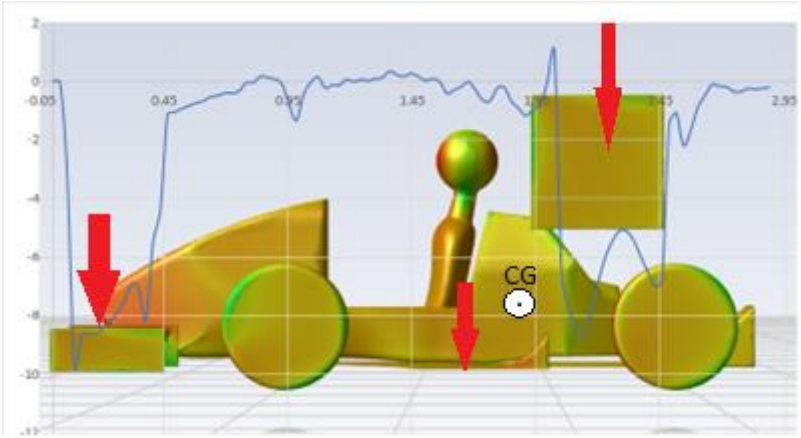
com o menor arrasto possível, dentro das limitações de geometria e projeto do veículo. Tendo em vista um veículo de Fórmula SAE, dentro dos padrões de projeto e construção dessa modalidade, não é possível implementar muitos dispositivos diferentes. Dessa forma, pode-se destacar os dispositivos detalhados nas seções 2.6.1 e 2.6.2.

2.6.1 Asas

2.6.1.1 Perfil principal e subelementos

As asas são responsáveis pela maior quantidade de *downforce* presente no veículo, mas também responsável pelo grande aumento do arrasto. Geralmente são implementadas duas asas devido ao balanço das forças nos eixos dianteiro e traseiro, pensando sempre no momento aerodinâmico. Na Figura 18 é mostrado um exemplo de como esse balanço das cargas aerodinâmicas é feito em torno do centro de massa do carro.

Figura 18 – Esquema do balanço aerodinâmico indicando os locais de carga aerodinâmica em um modelo 3D de um carro de Fórmula SAE.



Fonte: Acervo do próprio autor.

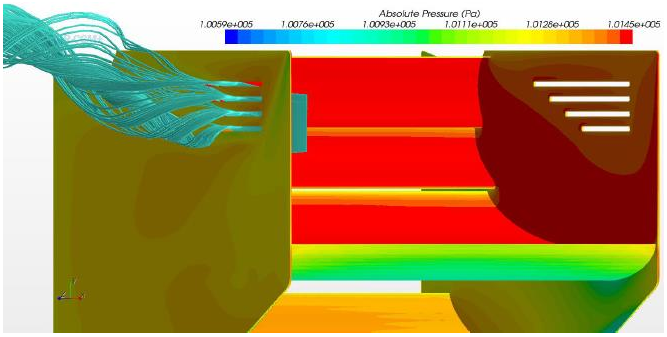
Pensando no ponto de aplicação dessas forças, analisando o balanço é possível notar que é necessário que haja maior quantidade de *downforce* na asa traseira devido à menor distância em relação ao centro de massa; enquanto a menor força é aplicada na asa dianteira devido a maior distância desse centro.

Tendo em vista a asa traseira e seus elementos, pode-se dividir os tipos de elementos em dois: o elemento principal, e os subelementos. O elemento principal é

constituído pelo maior elemento, chamado de *mainplane*, e é responsável pela maior parte da *downforce* das asas, tanto dianteira quanto traseira. O perfil usado para o design do *mainplane*, sendo possível visualizar na Figura 20, geralmente tem um ângulo de ataque calculado para gerar a maior quantidade de *downforce* até o ponto que não cause o descolamento do ar, gerando *stall* (perda da sustentação aerodinâmica). Esse ângulo de ataque geralmente é inferior a 20º, e depende da escolha do perfil da asa.

Entre os subelementos que podem constituir uma asa traseira, pode-se destacar os perfis secundários (geralmente são usados no máximo dois), *beamwing* e *flap.* Os perfis secundários são implementados em formato de “cascata” em relação ao *mainplane*, e a fim de não perturbar o escoamento, eles são posicionados em um ângulo de 15º a 35º em relação ao próprio perfil de asa principal (DAZA, 2015). A *beamwing* é uma espécie de perfil secundário de asa, porém posicionado de forma mais isolada, sem interferir no escoamento geral, e aproveitando a região que inicialmente não era aproveitada e gera *downforce* adicional.

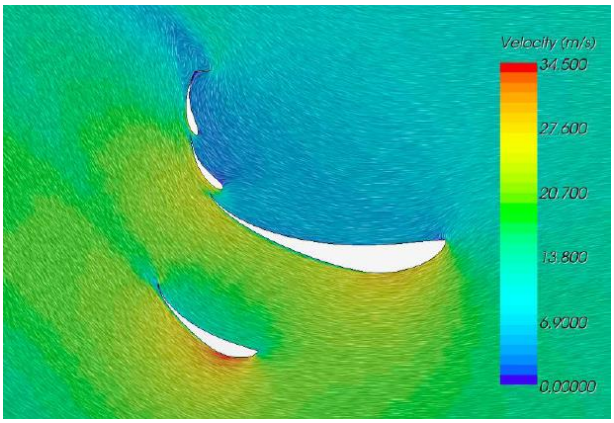
Figura 19 – Exemplo de simulação em CFD de uma asa traseira com todos os elementos.



Fonte: DAZA (2015).

Na Figura 20 é possível visualizar a *beamwing* abaixo dos demais perfis. O flap é um elemento localizado geralmente na saída do escoamento em um perfil, na parte traseira da asa. Ele é uma espécie de parede em 90º com a superfície em que está posicionado, criando vórtices de ar nessa região, gerando downforce a partir do aumento da pressão na asa (ANDERSON, 2016). O flap é notado na ponta do perfil de asa mais acima na Figura 20, e os demais elementos comentados são vistos na Figura 19.

Figura 20 – Visualização dos perfis aerodinamicos usados em uma asa traseira.



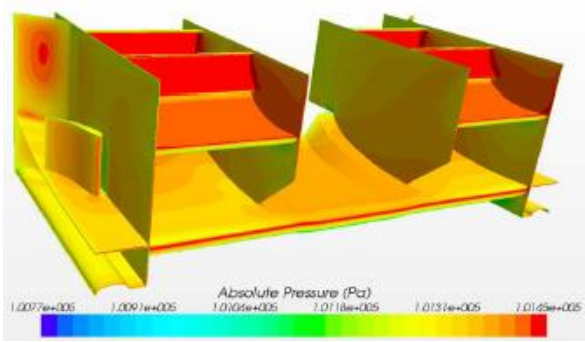
Fonte: DAZA (2015).

2.6.1.2 *Endplates* e *Footplates*

As asas possuem alguns outros elementos que também desempenham papel fundamental para melhor desempenho, mas que não estão localizados na região dos perfis, e sim em suas laterais, “envelopando” esses perfis. Esses elementos são os chamados *endplates* e *footplates*, posicionados geralmente na vertical e horizontal respectivamente, podendo sofrer alterações no formato, como curvatura por exemplo.

Os *endplates* de uma asa ou aerofólio desempenham uma função muito importante devido à altas vorticidades nessa região e à necessidade de diminuir o arrasto gerado pelos pneus dianteiros, no caso da asa dianteira. Para isso, podem ser implementadas peças como os *Footplates* e defletores, os quais podem melhorar o desempenho da asa em cerca de 20% (DAZA, 2015). A Figura 21 mostra um exemplo de modelo 3D de uma asa dianteira que tem tanto *endplates* quanto *footplates* em sua composição.

Figura 21 – *Endplates* e *Footplates* em um modelo 3D da asa dianteira simulada em CFD.



Fonte: DAZA (2015).

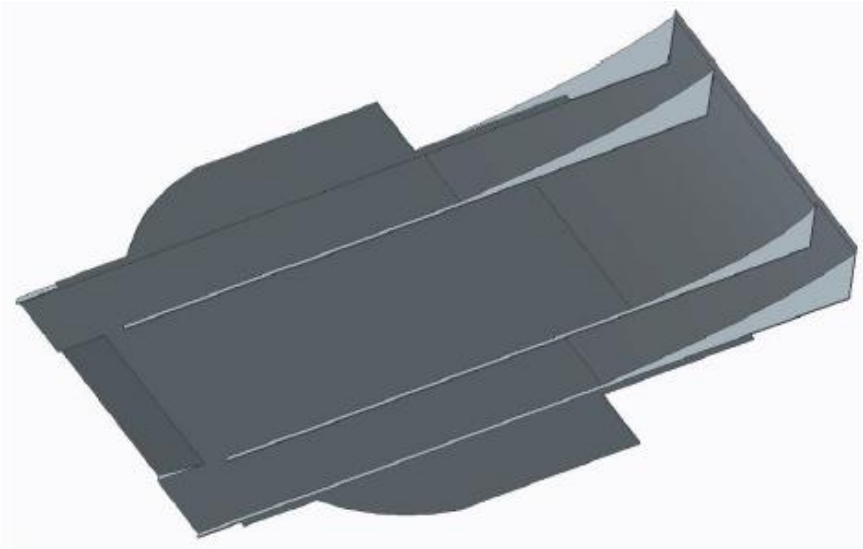
A região dos *endplates* da asa dianteira, por exemplo, permite fazer diferentes modificações e otimizações. Aqui, deve-se ter em mente um aspecto importante: as baixas pressões geradas na criação de vórtices podem contribuir à geração de *downforce* adicional para otimizar o desempenho nas pontas da asa. A fim de aplicar esta última ideia na asa dianteira, foi implementada uma peça aerodinâmica conhecida como *footplate,* localizada na parte através do aumento na magnitude dos vórtices formados embaixo das pontas da asa devido ao movimento de ar desde a parte externa para a parte inferior da asa dianteira. Uma geometria semicircular ou curva do *footplate* cria um vórtice com maior magnitude em comparação com o *footplate* plano (DAZA, 2015).

2.6.2 *Undertray*

Tendo em vista que é possível gerar grandes quantidades de *downforce* com pouco arrasto induzido a partir do uso de uma geometria específica devido ao fluxo na parte inferior do carro e o efeito solo, pode-se destacar um dispositivo aerodinâmico como responsável: o *undertray*, chamado também de Venturi ou sub assoalho.

Devido às limitações de geometria do assoalho, como por exemplo motor e caixa de câmbio que precisam estar mais próximas o possível ao solo, o *undertray* assume uma forma semelhante a um tubo de Venturi, mostrado na Figura 22. É possível explicar como a *downforce* é gerada a partir do uso da Equação de Bernoulli (Equação 3), onde é gerada a sustentação negativa por meio do “estrangulamento” do ar que flui embaixo do carro, acelerando o ar por baixo e, por isso, criando uma zona de baixa pressão. Com a pressão alta em cima e pressão baixa no inferior, é criada a força em direção ao solo, a *downforce* (KATZ, 1995).

Figura 22– Típica geometria de *undertray* em veículos de Fórmula SAE.

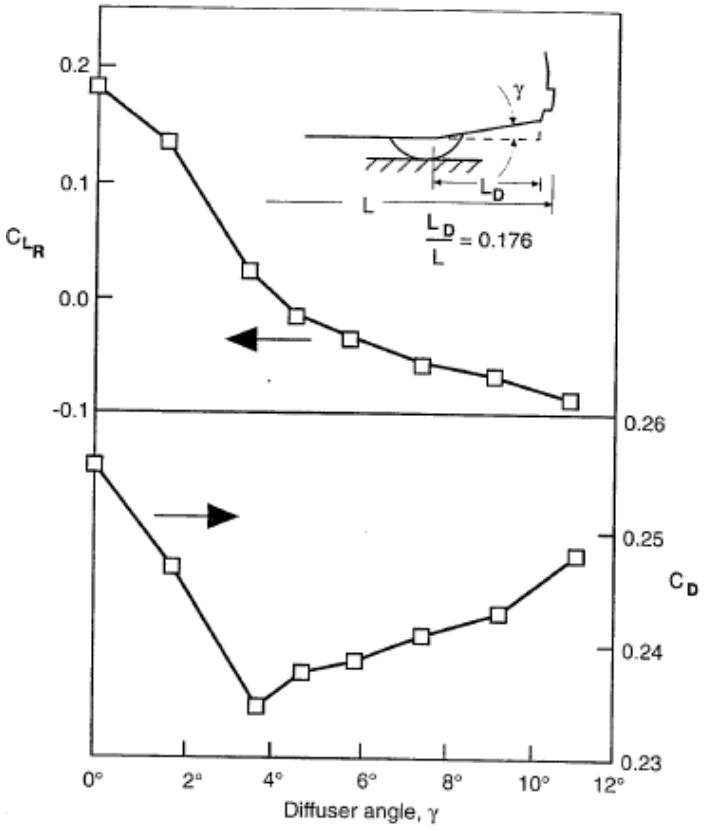


Fonte: (DAZA, 2015)

Assim como é possível ver na Figura 22, o *undertray* é um dispositivo aerodinâmico que não apresenta grande área frontal projetada, e, portanto, não gera quantidades significativas de arrasto induzido; em compensação a quantidade de *downforce* vinda desse dispositivo é grande. Dessa forma, pode-se afirmar que em termos da razão L/D (no caso, a razão *downforce* sobre arrasto) mostra que o *undertray* tem o melhor custo – benefício em termos de aerodinâmica.

Quanto à parte traseira do *undertray*, a curvatura e ângulo de saída dessa região, que é chamada de difusor, tem grande importância nos valores dos coeficientes aerodinâmicos. Por isso é importante, durante a fase de projetos, simular em CFD vários ângulos de saída γ do difusor e analisar qual faixa de valores de γ gera o desempenho do *undertray*.

Figura 23– Efeito do ângulo de saída do difusor nos coeficientes de *lift* e arrasto.



Fonte: KATZ (1995).

Na Figura 23 é mostrado o gráfico com a faixa de valores de ângulo de saída do difusor e os valores do coeficiente de lift negativo e coeficiente de arrasto em um veículo sedan. Analisando, pode-se observar que, para o exemplo do carro sedan, a faixa de ângulo de saída entre 2º e 8º proporciona os melhores resultados, com o C_L gerando as maiores quantidades de downforce, e com o C_D gerando as menores quantidades de arrasto aerodinâmico.

É importante ressaltar que, mesmo que o exemplo estudado seja de um veículo *enclosed wheel* modelo *sedan*, porém funciona dessa maneira para todos os carros, inclusive em um carro de Fórmula SAE.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foi selecionado o veículo de Fórmula SAE da Equipe Fênix Racing, da UNESP de Ilha Solteira, usado na competição nacional de 2022. O veículo escolhido possui o que foi classificado como pacote aerodinâmico completo, que consiste no uso de asas (dianteira e traseira) e *undertray*.

Quanto ao percurso que será usado para medir o tempo e desempenho desse carro, foi escolhido o *Skid* Pad devido ao percurso possuir formato circular em toda sua extensão, ajudando na análise das forças descritas na seção 2.4, que se manifestam mais intensamente durante curvas em um percurso. Os testes foram realizados variando entre o uso do pacote completo e o carro sem esses dispositivos, a fim de estudar como o desempenho do carro em pista é influenciado com o uso desses dispositivos aerodinâmicos citados.

3.1 Dispositivos Aerodinâmicos

Tendo em vista que os dispositivos aerodinâmicos existentes podem ser usados em um veículo de Fórmula SAE, porém com adaptações para a categoria, é destacado nas seções seguintes os dispositivos usados no carro durante o ano de 2022 da Equipe Fênix Racing.

Todos os dispositivos aerodinâmicos apresentados, bem com a carenagem do carro (bico e laterais) foram fabricados usando o processo conhecido como laminação. Esse processo de fabricação consiste na aplicação de resina, no caso Epóxi, no tecido de fibra de vidro. As gramaturas dos tecidos usados foram de 200 g/m² e 460 g/m², e os critério usados na escolha dessas gramaturas foram o custo-benefício e acabamento da superfície da peça.

Quanto a quantidade de camadas de tecido e resina das peças, foi decidido que seria necessário somente duas camadas laminadas devido ao esforço mecânico que cada peça teria. De modo geral, o tecido de maior gramatura foi usado na primeira camada por ter maior resistência, porém pior acabamento. Consequentemente, o tecido de menor gramatura foi usado na segunda camada, que seria a superfície que entra em contato com o ar efetivamente, por possuir menor rugosidade depois de laminada.

Sobre o acabamento, pode-se destacar o uso de massa plástica automotiva em toda a superfície das peças laminadas, e em seguida o uso de massa rápida para consertar eventuais buracos na laminação e reduzir ainda mais a rugosidade da superfície. Ao finalizar o processo de funilaria.

3.1.1 Pacote aerodinâmico completo

Na Figura 24 é mostrado o veículo analisado neste trabalho, que foi testado primeiramente sem os dispositivos aerodinâmicos, e posteriormente com o pacote aerodinâmico completo (asa dianteira, traseira e *undertray*) durante a competição de 2022.

Figura 24 – Veículo de Fórmula SAE usado no ano de 2022.

Fonte: Acervo do próprio autor.

3.1.1.1 Asas

Separadamente, na Figura 25, bem como na Figura 26 são mostradas as asas do veículo, primeiro a dianteira e depois a traseira. Elas seguem o modelo discutido na seção 2.6.1, porém sem a presença de *footplates*.

Figura 25 – Asa dianteira do carro de 2022.

Fonte: Acervo do próprio autor.

Figura 26 – Asa traseira do carro de 2022.

Fonte: Acervo do próprio autor.

3.1.1.2 *Undertray*

De modo semelhante à seção anterior, a Figura 27 mostra o *undertray* durante a competição de 2022, com o foco em seu difusor.

Figura 27 – *Undertray* usado no veículo de 2022.

Fonte: Acervo do próprio autor.

3.2 Provas dinâmicas da competição

Durante a competição de Fórmula SAE, que conta com a participação de faculdades de engenharia do Brasil inteiro, os veículos são avaliados por meio de diferentes testes, e são divididas em: provas estáticas; provas dinâmicas e apresentações.

Dentre as provas estáticas, temos as etapas de segurança, que atestam o bom funcionamento de cada carro para que não haja acidentes durante as provas dinâmicas. Essas etapas são a inspeção técnica, onde são checados todos os componentes e sistemas críticos; frenagem, que testa o bom funcionamento dos freios; *tilt table*, que posiciona o carro em uma plataforma que é inclinada até 60º e testa se há vazamento de fluidos ou se alguma roda descola da plataforma; e *noise*, onde posiciona-se um decibelímetro próximo ao escape do carro e ele não pode ultrapassar uma determinada faixa de decibéis quando acelera desengatado.

Quanto às provas dinâmicas, temos: Aceleração, onde o carro percorre uma linha reta de 75 metros de comprimento o mais rápido possível; *Skid Pad*, que consiste em um circuito em formato do número 8, e corre duas vezes um círculo antes de trocar o lado do 8 em que gira; *Autocross*, onde percorre-se o circuito completo duas vezes; e o Enduro, principal prova, que consiste em 22 voltas no circuito completo. Cada

prova dinâmica é possível ser disputada duas vezes, com dois pilotos diferentes, com exceção do Enduro, onde há uma troca de piloto depois de 11 voltas percorridas.

As provas de apresentação são as etapas escolhidas para que a equipe exponha como foi o projeto, construção e testes de seu veículo. Geralmente, analisa-se primeiro cada área isoladamente, depois há um foco maior em apresentação de custos e manufatura de alguns sistemas escolhidos pela organização.

A fim de observar melhor os efeitos que a aerodinâmica pode exercer em um veículo de Fórmula SAE, foi escolhida a prova *Skid Pad* como foco para análise de dados, uma vez que em curvas há maior complexidade dinâmica do carro como um todo, bem como a relação mais intensa entre aerodinâmica e suspensão, assim como discutido nas seções anteriores.

3.2.1 *Skid Pad*

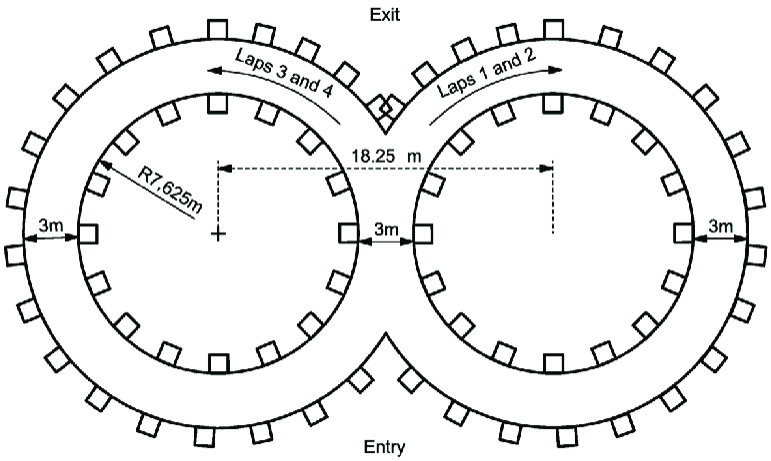
Esta prova foi escolhida por consistir em curvas contínuas, assim evidenciando as características dinâmicas discutidas na seção 2.4, onde é trabalhada mais intensamente a relação entre forças aerodinâmicas e suspensão do veículo. Por apresentar essa complexidade, a análise do desempenho do veículo primeiramente sem os dispositivos aerodinâmicos e posteriormente com o pacote aerodinâmico completo (asas e *undertray*) será mais completa em relação à outras provas dinâmicas.

Figura 28 – Carro da Equipe Fênix Racing de 2022 durante a prova de *Skid Pad* na competição nacional.

Fonte: Acervo do próprio autor.

A prova funciona da seguinte forma: o piloto inicia a prova no meio do formato em oito, na intersecção dos dois círculos. Inicialmente, ele percorre duas voltas completas em um círculo, que possui 7,62 metros de raio interno e 2,5 metros de largura de pista, e em seguida muda o lado circuito em oito e percorre mais duas voltas completas no segundo círculo, de igual raio. Cada piloto (são dois) tem direito a duas voltas no circuito completo, totalizando quatro voltas em cada lado do circuito. Os tempos de volta são todos medidos, porém o tempo que realmente é contabilizado e recebe pontuação é o referente à segunda volta em um lado do circuito. Caso o piloto derrube cones, há descontos em sua pontuação final como penalidade.

Figura 29 – Esquema do circuito de *Skid Pad* usado na competição.



Fonte: RZADKOWSKI (2020).

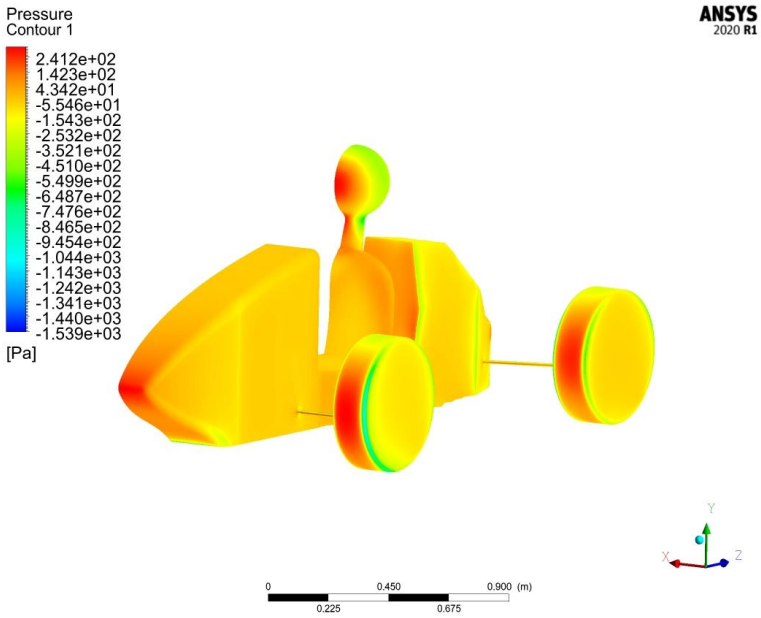
Para realização dos testes pré-competição, foi utilizado o mesmo padrão usado durante a competição, a fim de garantir que os dados obtidos sem os dispositivos aerodinâmicos sejam medidos com as mesmas condições da competição. A única alteração será a quantidade de voltas de cada piloto, uma vez que diferente da competição, durante os testes não há limite máximo de voltas completas por piloto. Dessa forma, foi realizado um número maior de voltas por piloto, onde será calculada posteriormente a média de tempo de volta de cada piloto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados obtidos usando CFD

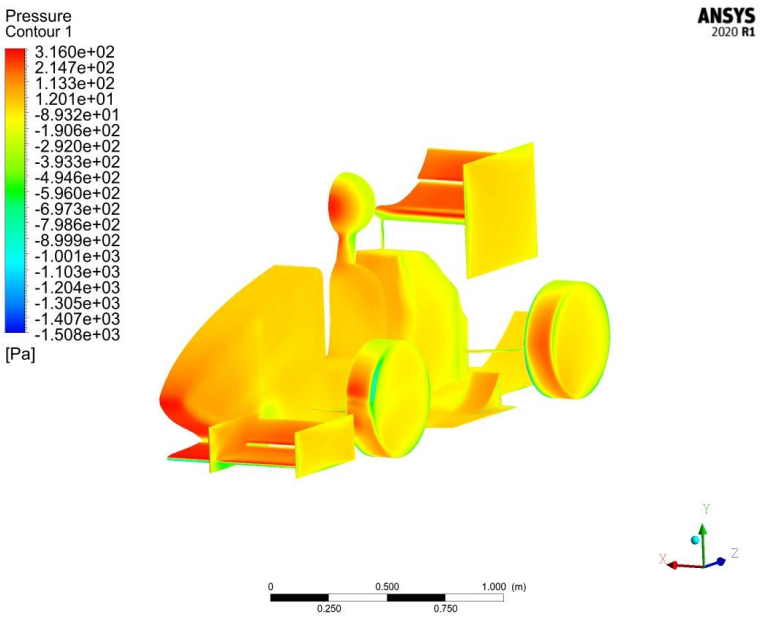
A fim de obter os parâmetros aerodinâmicos referentes ao carro todo, foram realizadas diversas simulações em CFD, primeiramente sem os dispositivos aerodinâmicos, e posteriormente com eles para estimar os efeitos que a aerodinâmica teria no veículo. A Figura 30 mostra o modelo 3D do veículo sem os dispositivos, e a Figura 31 mostra o modelo 3D do veículo com todos os dispositivos. As médias dos parâmetros obtidos nesses dois tipos de simulação estão dispostas na Tabela 4.

Figura 30 – Modelo 3D em CFD sem os dispositivos aerodinâmicos.



Fonte: Acervo do próprio autor.

Figura 31 – Modelo 3D em CFD com todos os dispositivos aerodinâmicos.



Fonte: Acervo do próprio autor.

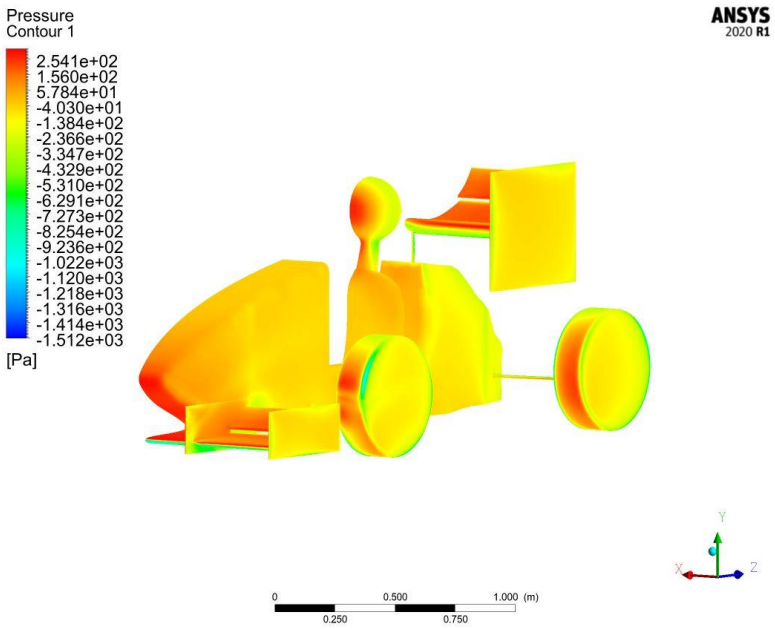
Tabela 4 – Parâmetros aerodinâmicos obtidos por simulações numéricas.

Parâmetro	Carro sem dispositivos	Carro completo
C_D	0,501	1,119
C_L	- 0,043	- 2,750
Área frontal (m²)	0,595	0,905

Fonte: Próprio autor.

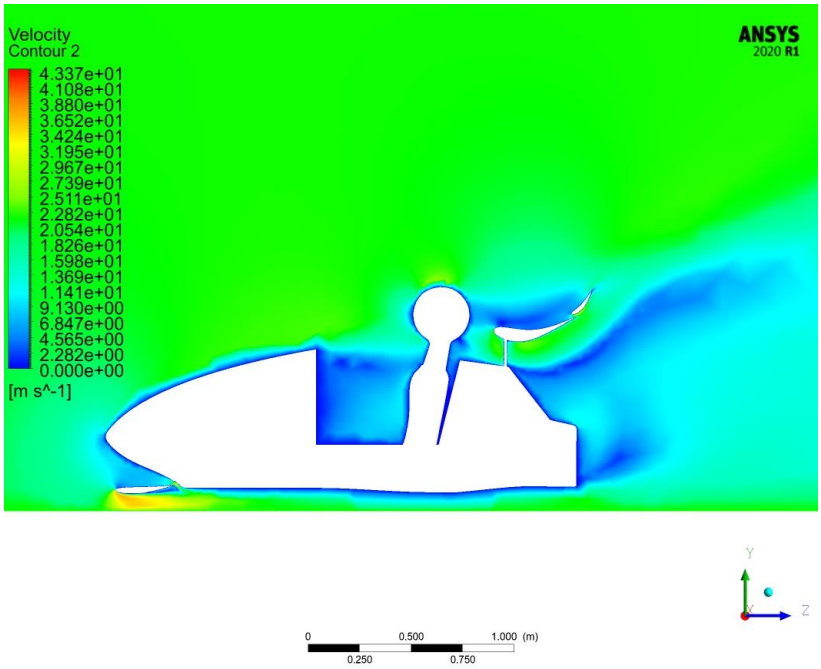
Durante a fase de projetos, foram feitas diversas simulações numéricas usando como base modelos 3D a fim de verificar se as geometrias selecionadas estão de fato com coeficientes de arrasto e *downforce* melhores do que outros modelos desenhados. O modelo simulado em CFD, que contém o carro somente com as duas asas, sem o *undertray* (para compreender isoladamente a influência das asas no desempenho), é mostrado tanto na Figura 32 quanto na Figura 33, e os respectivos valores dos parâmetros aerodinâmicos obtidos se encontram na Tabela 5.

Figura 32 – Carro somente com as asas durante simulações em CFD.



Fonte: Acervo do próprio autor.

Figura 33 – Mapa de velocidade do carro somente com as asas durante simulações em CFD.



Fonte: Acervo do próprio autor.

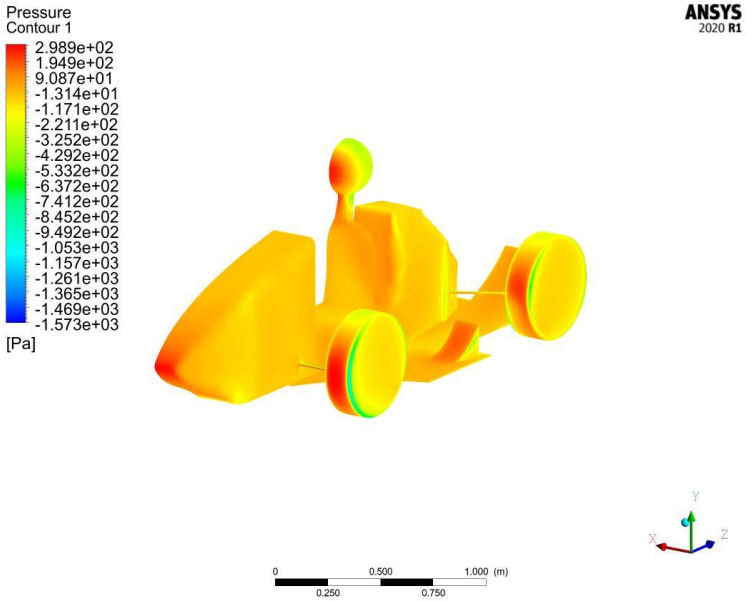
Tabela 5 – Parâmetros aerodinâmicos do veículo obtidos por simulações numéricas usando somente as asas.

Parâmetro	Carro sem dispositivos	Carro somente com asas
C_D	0,501	1,119
C_L	- 0,043	-2,349
Área frontal (m^2)	0,595	0,845

Fonte: Próprio autor.

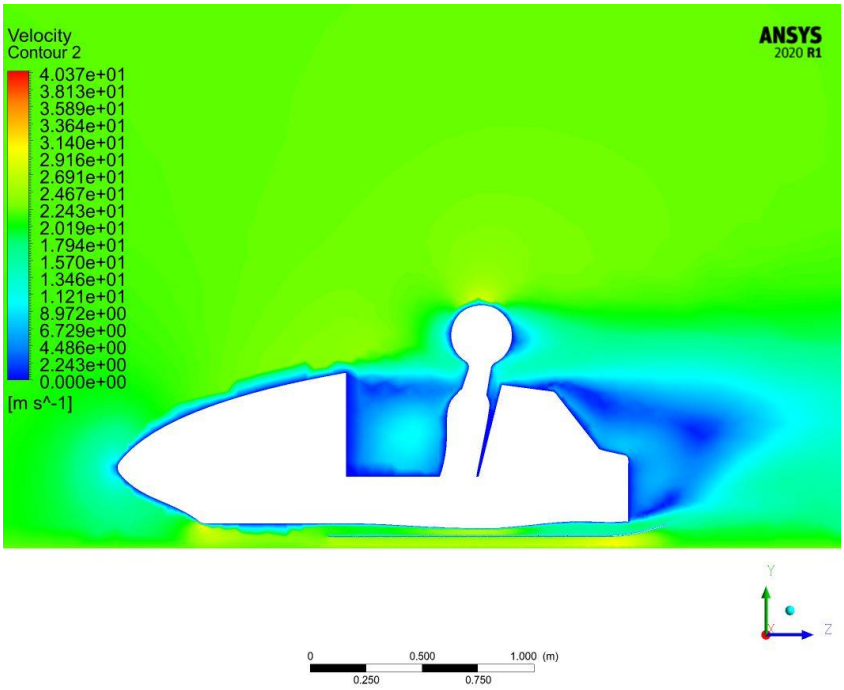
Assim como as asas, também foram realizadas diversas simulações de modelos 3D do carro, dessa vez somente usando o *undertray* como dispositivo aerodinâmico, a fim de compreender o quanto esta peça poderia influenciar o veículo em pista. Tanto a Figura 34 quanto a Figura 35 mostram o modelo do carro durante simulações em CFD.

Figura 34 – Mapa de pressão do *Undertray* no modelo 3D do veículo durante simulações em CFD.



Fonte: Acervo do próprio autor.

Figura 35 – Mapa de velocidade do *Undertray* no modelo 3D do veículo durante simulações em CFD.



Fonte: Acervo do próprio autor.

Para facilitar a análise dos dados, tem-se os parâmetros aerodinâmicos obtidos por meio das simulações em CFD presentes na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros aerodinâmicos do veículo obtidos por simulações numéricas usando somente o *undertray*.

Parâmetro	Carro sem dispositivos	Carro com *undertray*
C_D	0,501	0,650
C_L	- 0,043	- 1,104
Área frontal (m²)	0,595	0,712

Fonte: Próprio autor.

É importante ressaltar que toda análise aerodinâmica realizada não apresenta comportamento linear, e não é possível afirmar que um dispositivo tem uma certa porcentagem fixa de participação na geração de forças aerodinâmicas. Cada dispositivo interage com o carro todo de diferentes maneiras, e a presença de outro dispositivo próximo a esse modifica os coeficientes aerodinâmicos de diferentes maneiras. Dessa forma, pode-se observar os efeitos que o uso de cada dispositivo

causa quando presente no carro usando os resultados obtidos durante a análise em CFD, uma vez que analisá-los isoladamente, avulsos ao carro, não teria resultados próximos aos reais.

A partir da simulação numérica em CFD do modelo 3D do carro, foi possível observar que o os coeficientes aerodinâmicos sofreram grandes alterações quando foram implementados os dispositivos aerodinâmicos citados.

Quando comparados os coeficientes de arrasto (C_D) do carro sem os dispositivos e o veículo usando o pacote aerodinâmico completo, é possível notar um aumento desse coeficiente de aproximadamente 123,35% quando as asas e *undertray* estão presentes. Isso se dá pelo fato de que as asas possuem grande área frontal projetada em relação ao carro completo, e isso é explicitado pela grande quantidade de arrasto induzido que aparece durante a simulação. Assim como já comentado anteriormente, o *undertray* tem pequena influência nesse aumento do coeficiente de arrasto por causa da pequena área frontal projetada que possui.

Tendo em vista o *trade-off* entre o aumento de arrasto com o aumento de *downforce* explicado na seção 2.2.3, é possível notar que os valores encontrados do coeficiente de *lift* (com valores negativos sendo *downforce*), tiveram grande aumento em seu valor absoluto quando o carro possui o pacote aerodinâmico completo. Quando comparamos os valores de C_L do veículo sem os dispositivos e com eles, nota-se um aumento de mais de 62 vezes do coeficiente (cerca de 6295%) quando estão presentes as asas e o *undertray*. Esse imenso valor do aumento do coeficiente tem como causa o baixo valor de C_L que os veículos em geral possuem quando não estão usando nenhum dispositivo que gera *downforce*, então qualquer alteração nesse padrão resulta em um enorme aumento.

4.2 Testes pré-competição

Para possibilitar a análise do quanto os dispositivos aerodinâmicos podem influenciar o desempenho em pista de um veículo de Fórmula SAE, primeiro foram realizados testes antes da competição, e sem o uso desses dispositivos. O percurso foi o mesmo da competição, o *Skid Pad*, consistiu em 10 voltas de cada piloto, simulando o dia da prova, que possibilita a realização do circuito com dois pilotos.

O primeiro piloto a realizar as 10 voltas foi o Mário, e os tempos de volta e as respectivas velocidades que o piloto obteve durante os testes de *Skid* Pad pré competição estão contidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Tempos de volta e a respectiva velocidade do piloto Mário no *Skid Pad* sem os dispositivos aerodinâmicos.

Volta	Tempo (s)	Velocidade (km/h)
1	8,26	24
2	8,29	24
3	7,80	25
4	7,45	26
5	7,38	27
6	7,32	27
7	7,01	28
8	7,31	27
9	7,11	28
10	7,13	28

Fonte: Próprio autor.

A partir dos valores obtidos mostrados na Tabela 7, pode-se calcular o tempo médio que o piloto levou para completar uma volta e qual foi a velocidade média do carro durante o percurso. Os valores médios estão presentes na Tabela 8.

Tabela 8 – Tempo e velocidade média de volta do piloto Mário no Skid Pad sem os dispositivos aerodinâmicos.

Parâmetro	Valor	Desvio padrão
Tempo médio de volta (s)	7,50	0,46
Velocidade média (km/h)	26,4	1,58

Fonte: Próprio autor.

Da mesma maneira, foram realizados os testes com o segundo piloto, o Daniel. Os tempos das 10 voltas percorridas, bem como as respectivas velocidades estão presentes na Tabela 9.

Tabela 9 – Tempos de volta e respectiva velocidade do piloto Daniel no *Skid Pad* sem os dispositivos aerodinâmicos.

Volta	Tempo (s)	Velocidade (km/h)
1	6,94	29
2	6,98	28
3	6,57	30
4	6,96	28
5	6,81	29
6	6,94	28
7	6,69	30
8	6,94	28
9	6,70	30
10	6,89	29

Fonte: Próprio autor.

A partir dos valores contidos na Tabela 9, foi possível calcular o tempo médio de volta, bem como a velocidade média do piloto Daniel durante o teste. Esses valores são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Tempo e velocidade média de volta do piloto Daniel no Skid Pad sem os dispositivos aerodinâmicos.

Parâmetro	Valor	Desvio padrão
Tempo médio de volta (s)	6,84	0,14
Velocidade média (km/h)	28,9	0,87

Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, tem-se todos os tempos de volta e as respectivas velocidades durante os testes pré competição, que foram realizados sem o uso de quaisquer dispositivos aerodinâmicos. Com isso, torna-se possível avaliar o quanto esses dispositivos influenciam quando implementados no veículo de Fórmula SAE, que será analisado nas demais seções, por meio dos tempos de volta e velocidade.

4.3 Tempos de volta na competição

A partir da realização da prova de *Skid Pad* durante a competição, foi possível obter os tempos de volta de cada um dos pilotos já citados, bem como a velocidade durante cada volta. Durante toda a competição, fez-se uso do pacote aerodinâmico, que consiste neste caso em asas dianteira e traseira e *undertray*.

Na Tabela 11 estão apresentados os tempos de volta e as respectivas velocidades de cada piloto durante a prova.

Tabela 11 – Tempos de volta e respectiva velocidade dos pilotos Mário e Daniel no *Skid Pad* durante a competição, utilizando o pacote aerodinâmico.

Volta	Piloto	Tempo (s)	Velocidade (km/h)
1	Mário	6,27	32
2	Mário	6,16	32
3	Mário	6,23	32
4	Mário	5,81	34
5	Daniel	6,02	33
6	Daniel	6,23	32
7	Daniel	6,06	33

8	Daniel	6,14	32

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 12, tem-se os valores calculados dos tempos médios de volta, bem como as respectivas velocidades médias para cada piloto durante o *Skid Pad* na competição.

Tabela 12 – Tempo e velocidade média de volta do pilotos Mário e Daniel no Skid Pad durante a competição, utilizando o pacote aerodinâmico.

Parâmetro	Valor
Tempo médio de volta Mário (s)	6,12
Tempo médio de volta Daniel (s)	6,11
Velocidade média Mário (km/h)	32,7
Velocidade média Daniel (km/h)	32,9

Fonte: Próprio autor.

4.4 Comparação entre os tempos de volta e velocidades médias

A partir dos valores calculados e apresentados na Tabela 13, é possível analisar os efeitos que os dispositivos aerodinâmicos tiveram durante o circuito, por meio da comparação entre os tempos de volta e velocidades durante os testes e competição.

Tabela 13 – Comparação entre os tempos e velocidades médias de volta dos dois pilotos.

Parâmetro	Testes (Mário)	Competição (Mário)	Testes (Daniel)	Competição (Daniel)
Tempo médio de volta	7,50	6,12	6,84	6,11
Velocidade média	26,4	32,7	28,9	32,9

Fonte: Próprio autor.

Tanto o piloto Mário quanto o piloto Daniel apresentaram menores tempos de volta quando o carro estava usando o pacote aerodinâmico, bem como maiores velocidades médias.

Analisando os tempos do piloto Mário, é possível notar que houve uma redução de 18,4% em seu tempo médio de volta. Quanto à velocidade, houve aumento de 23,9% em relação à velocidade média sem os dispositivos aerodinâmicos.

Da mesma forma, o tempo médio de volta do piloto Daniel teve redução de 10,7% em relação ao seu tempo médio quando estava sem o pacote aerodinâmico. Sua velocidade média, quando utilizado o pacote aerodinâmico, teve aumento de 13,8% em relação à sua velocidade média quando testado sem os dispositivos aerodinâmicos.

Com base nos dados apresentados na Tabela 13, bem como na Tabela 14, é possível dizer que houve influência dos dispositivos aerodinâmicos no desempenho do veículo, uma vez que, assim como descrito na seção 2.4.2, a *downforce* gerada pelas asas e *undertray* foi responsável pelo aumento da aderência dos pneus com a pista, possibilitando maiores velocidades em curvas, e consequentemente aumentando a estabilidade durante todo o circuito.

Tabela 14 – Comparação do desempenho do veículo para cada piloto e cada configuração aerodinâmica.

Parâmetro	Sem dispositivos	Com dispositivos	Melhoria do desempenho
Tempo médio de volta - Mário (s)	7,50	6,12	- 18,4%
Velocidade média - Mário (km/h)	26,4	32,7	+ 23,9%
Tempo médio de volta - Daniel (s)	6,84	6,11	- 10,7%
Velocidade média - Daniel (km/h)	28,9	32,9	+ 13,8%

Fonte: Próprio autor.

É importante ressaltar que essa melhoria pode ser uma junção de outros fatores, como o fator humano por exemplo (condições dos pilotos no dia), condições

de pista, entre outros. Porém, mesmo em baixas velocidades, como o caso do *Skid Pad*, a *downforce* gerada teve influência na melhoria do desempenho do veículo durante a execução dos testes e competição nesta prova em específico.

A partir da visualização da Tabela 14, pode-se observar considerável influência dos dispositivos na redução dos tempos de volta, bem como o aumento das velocidades de ambos os pilotos. Conforme descrito na seção 2.4.2, há o aumento do controle do veículo durante as curvas por causa do aumento da carga na componente Fz (força normal ao solo) em todos os pneus do carro. Isso faz com que o veículo consiga desenvolver maiores velocidades até atingir a velocidade limite que inicia o deslizamento dos pneus na pista, suportando maior intensidade de força lateral (Fy).

Uma análise mais aprofundada da relação das forças aerodinâmicas com os tempos de volta será feita na seção 4.5.

4.5 Forças Aerodinâmicas

Assim como comentado anteriormente, o aumento da componente vertical da força nos pneus, a chamada Fz, é proveniente da *downforce* gerada pela interação dos dispositivos aerodinâmicos com o ar.

Apesar do carro conseguir atingir, durante a realização do *Skid Pad*, baixas velocidades, atingindo no máximo aproximadamente 33 km/h, houve considerável melhora no desempenho do veículo ao fazer uso desses dispositivos. Quando são comparadas as cargas aerodinâmicas geradas com e sem o uso do pacote aerodinâmico, pode-se observar considerável aumento tanto na *downforce* quanto no arrasto aerodinâmico. Assim como comentado na seção 2.2, o *trade-off* entre o aumento da *downforce* acarretando o aumento do arrasto aerodinâmico se torna visível quando observado a Tabela 15, onde são mostrados os valores das forças aerodinâmicas que atuam no veículo com e sem os dispositivos.

Os cálculos realizados para obtenção dos valores das forças aerodinâmicas foram feitos usando como base os valores dos coeficientes fornecidos pelo *software* de CFD *Ansys Fluent*^{TM}, com a velocidade de 33 km/h. Os valores desses coeficientes estão dispostos na Tabela 4.

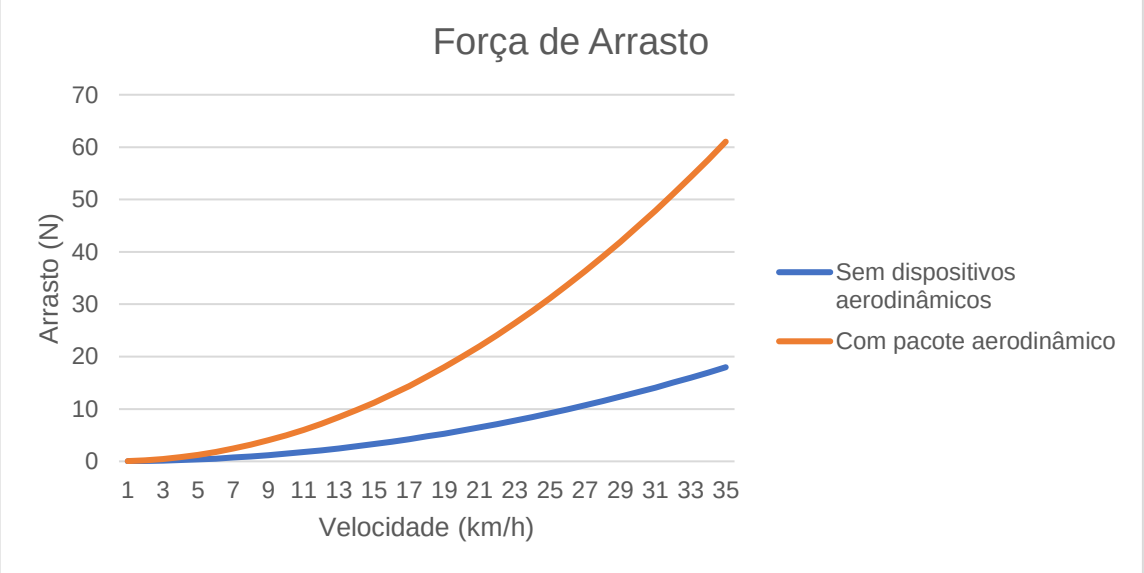
Tabela 15 – Forças aerodinâmicas atuando no veículo com e sem a presença dos dispositivos aerodinâmicos.

Parâmetro	Sem pacote aerodinâmico	Com pacote aerodinâmico
Força de Arrasto (N)	15,97	54,26
Downforce (N)	- 1,37	- 133,35

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 36, é mostrado um gráfico que representa o comportamento da força de Arrasto aerodinâmico no veículo conforme o aumento da velocidade. A partir da análise desse gráfico, é possível notar que o comportamento exponencial da força faz com que a pouca variação da velocidade acarreta um grande aumento da força de resistência do ar, podendo até ultrapassar os 60 N quando a 35 km/h.

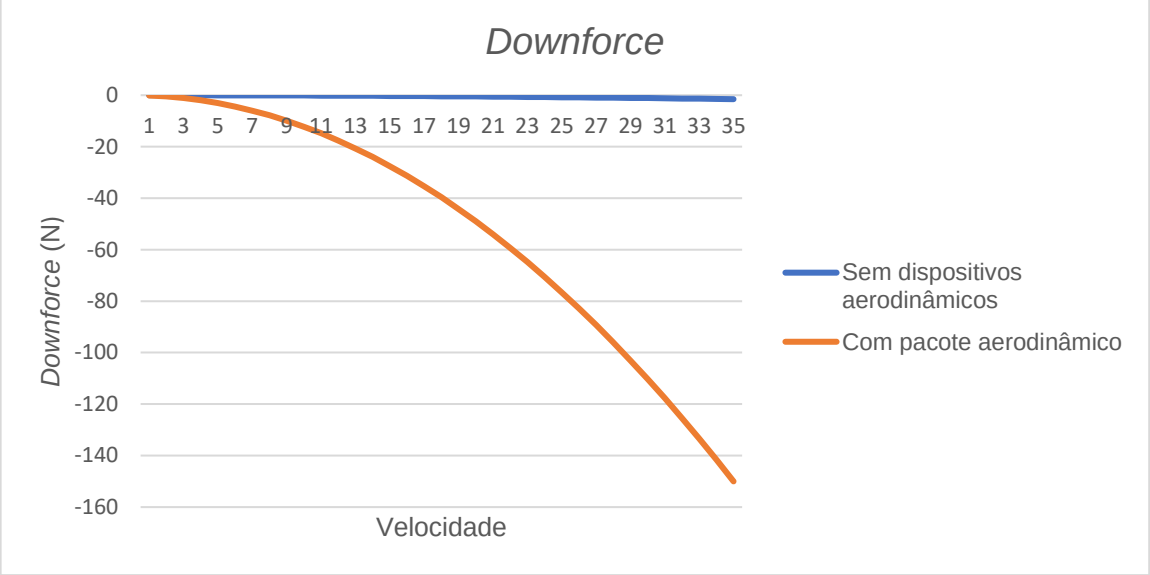
Figura 36 – Intensidade da força de Arrasto com a variação de velocidade.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 37 mostra comportamento da *downforce* com o aumento da velocidade do veículo. A partir da análise deste gráfico, é possível observar que, de forma mais abrupta, a *downforce* aumenta sua intensidade a medida em que a velocidade aumenta. De forma também exponencial, a implementação do pacote aerodinâmico faz com que, mesmo em baixas velocidades, o carro consiga obter quantidades significantes de carga aerodinâmica em seus pneus.

Figura 37 – Intensidade da força de *Downforce* com a variação de velocidade.

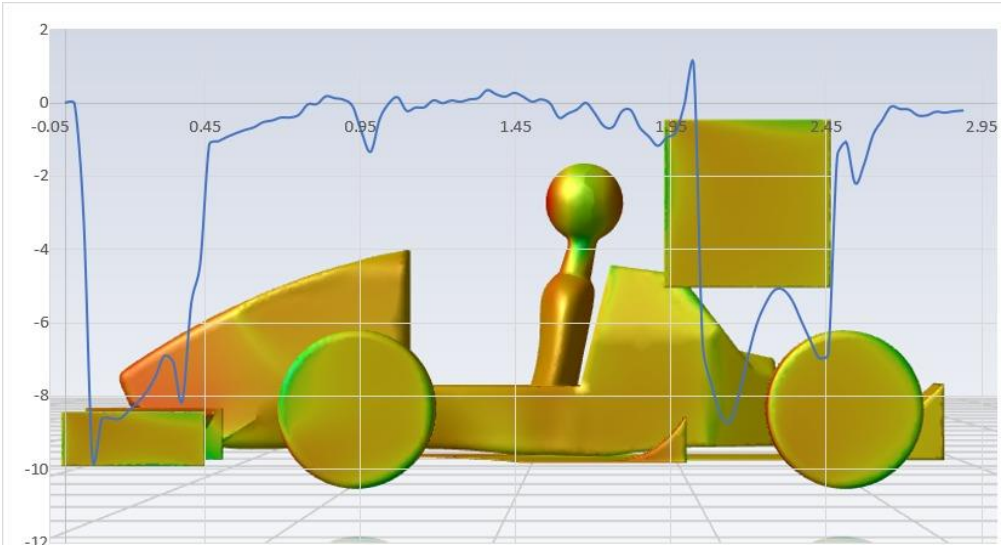


Fonte: Próprio autor.

A partir dessa análise, é possível observar que houve aumento em 3,4 vezes, ou seja, 240% de arrasto; enquanto a *downforce* teve aumento em 97 vezes, ou seja, 9633% de aumento de *downforce* quando utilizado o pacote aerodinâmico. Assim como comentado anteriormente, essa enorme diferença nos valores de *downforce* se dá pelo fato do carro de Fórmula SAE possuir, quando sem dispositivos aerodinâmicos, valores de C_L muito próximos de zero.

Na Figura 38, é mostrado o modelo 3D do veículo junto a um gráfico que mostra a distribuição de *downforce* em toda a sua superfície.

Figura 38 – Representação da distribuição de *downforce* em todo o veículo.



Fonte: Próprio autor.

Pelo projeto, e assim como é projetado em muitas vezes para veículos *open wheel*, é previsto que 40% da *downforce* seja aplicada na região da asa dianteira e 60% aplicada na asa traseira. Assim como comentado na seção 2.3.1.1, essa distribuição da carga aerodinâmica é usada pensando no Momento Aerodinâmico, onde o braço da força aplicada na asa dianteira é maior do que o da asa traseira.

A partir desse balanço, é possível estimar a quantidade de downforce que está agindo em cada ponto de contato do carro com a pista, ou seja, os pneus. A Tabela 16 mostra a quantidade de carga aerodinâmica, na componente Fz, normal ao solo, é aplicada em cada eixo do carro.

Tabela 16 – Distribuição da carga aerodinâmica nos eixos e rodas.

Posição	Força no eixo (N)	Força em uma roda (N)
Eixo dianteiro	53,34	26,67
Eixo traseiro	80,01	40,00

Fonte: Próprio autor.

A partir dos valores mostrados na Tabela 16, é possível identificar que quando o veículo está a 33 km/h, cada roda dianteira sofre uma carga aerodinâmica de aproximadamente 2,67 quilogramas, e cada roda traseira sofre carga de aproximadamente 4 quilogramas de força aerodinâmica vertical.

Observando os valores das cargas aerodinâmicas em cada eixo, é possível entender que, mesmo em baixas velocidades, tem-se uma considerável força aerodinâmica que empurra o carro para baixo, intensificando o contato dos pneus com a pista, e causando os efeitos descritos na seção 2.4.2. Quanto maior for a velocidade do veículo, maior será a intensidade dessa carga dos pneus, e maior será a velocidade que esse carro consegue empregar ao percorrer curvas sem deslizar lateralmente.

5. CONCLUSÕES

A partir da implementação do pacote aerodinâmico, que consiste em duas asas (dianteira e traseira) e *undertray*, foi possível aumentar o desempenho de um veículo de Fórmula SAE, mesmo atingindo baixas velocidades, e conseguindo diminuir os tempos de volta em circuitos com muitas curvas.

Com o uso desses dispositivos aerodinâmicos, o veículo analisado apresentou maior controle durante o circuito, atingindo maiores velocidades durante todo o percurso, bem como menores tempos em todas as voltas.

De acordo com os resultados deste trabalho, foi possível concluir que o uso de dispositivos aerodinâmicos, tanto em circuitos rápidos quanto em baixas velocidades, traz melhoria no desempenho em pista, aumentando o controle e estabilidade principalmente em curvas, a partir na maior carga empregada nos pneus proveniente das interações do ar com esses dispositivos.

Apesar do aumento considerável da força de arrasto aerodinâmico, a velocidade do veículo não foi reduzida durante o percurso analisado, uma vez que os benefícios provenientes da maior carga nos pneus compensaram essa perda vinda da maior força de resistência do ar.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos, destacam-se os seguintes temas e sugestões: estudo semelhante para as demais provas que compõe a competição de Fórmula SAE, uma vez que refinam a análise da influência dos dispositivos aerodinâmicos nos veículos em pista; a utilização dos Métodos de Validação Aerodinâmica, como o *Coast Down* e o Método da Velocidade Constante, para validar os dados obtidos a partir das simulações numéricas em CFD.

Ambas as sugestões são feitas com o intuito de melhorar a análise do desempenho do veículo em pista, nas situações mais próximas o possível da realidade, estudando o comportamento em diferentes situações e circuitos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aeroflap, Pedro Viana, **Tipos de asa e sua aerodinâmica** – perfis de Asa – parte 1 (2015).

< https://www.aeroflap.com.br/tipos_asa_perfis/ >

Acesso em: 23 de ago. de 2023.

Ballén Daza, D. A.; **Implementação de um pacote aerodinâmico em um veículo de Fórmula SAE**; 2015: 14 de dez.; Dissertação de mestrado.

Duke University Motorsport, Nova York, "**Aero and CFD**",

< https://www.dukefsae.com/single-post/2017/07/17/aero-and-cfd > Acessado em: 31 de ago. de 2023.

Emilia Romagna, F1 TV, Estados Unidos, **F1 Blast Lane,** 20 de abril de 2023.

<https://www.formula1.com/en/latest/article.f1-blast-lane-english.FU6lLXW5f7KzjY506s8NY.html > Acessado em 26 de set de 2023.

Federal Aviation Administration, **Mechanic Training Handbook – Airframe**.

< https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation > Acesso em: 08 de set.de 2023.

Formula 1 Dictionary, Rijeka, Croácia, 2021, "**Motions of a Formula 1 car**",

< https://www.formula1-dictionary.net/motions_of_f1_car.html > Acessado em: 28 de ago. de 2023.

Fox, R.W., McDonald, A.T. and Pritchard, P.J.; **Introdução à Mecânica dos Fluidos**, LTC, 6a ed. (2004). 2. White, F.M.

FUNDAMENTALS OF. AERODYNAMICS. 6º Edition. John D. Anderson, Jr. Professor of Aerospace Engineering. University of Maryland, 2016. McGraw-Hill, Inc. New York St.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. v. 2.

José Cardoso e Silva, **O Efeito Coanda e a sua aplicação prática**, 15 de set. de 2017.

< https://www.linkedin.com/pulse/o-efeito-coanda-e-sua-aplicação-prática-josé-cardoso-e-silva/?originalSubdomain=pt > Acesso em: 28 de ago. de 2023.

KATZ, J. **Race Car Aerodynamics: Designing for Speed**. 2º edição, Editora Bentley Publishers, Cambridge, MA, 1995.

MILIKEN, W. e D. **Race Car Vehicle Dynamics**. 1º edição, Society of Automotive Engineers International, 1994.

Web Ar Condicionado (WAC) **,Efeito Coanda explicado**, 2021).

< https://www.webarcondicionado.com.br/efeito-coanda-no-ar-condicionado> Acesso em: 24 de ago. de 2023.

Witold Rzadkowski, Research Gate, **Validation of Key Parameters Between Real and Computer Model of Suspension System Used in FSAE Vehicle,** setembro de 2020.

<https://www.researchgate.net/figure/FSAE-skid-pad-test-geometry-9_fig3_344028246 > Acessado em 15 de nov de 2023.