

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

PATRICK ERICSON DA SILVA MELO

INFLUÊNCIA DA ASA TRASEIRA NO ESCORREGAMENTO EM VEÍCULOS DE  
FORMULA 1

Joinville  
2023

PATRICK ERICSON DA SILVA MELO

INFLUÊNCIA DA ASA TRASEIRA NO ESCORREGAMENTO EM VEÍCULOS DE  
FORMULA 1

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Leonel R Cancino.

Joinville  
2023

PATRICK ERICSON DA SILVA MELO

INFLUÊNCIA DA ASA TRASEIRA NO ESCORREGAMENTO EM VEÍCULOS DE  
FORMULA 1

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de Junho de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Orientador: Dr. Leonel R Cancino.  
Orientador  
Presidente

---

Prof. Dr. Antônio Otaviano Dourado  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Modesto Hurtado Ferrer  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço minha família, por sempre estarem presente e me apoiando. Agradeço ao meu orientador por toda paciência durante o trajeto deste trabalho. Agradeço aos membros da banca por disponibilizarem do seu tempo para avaliarem o TCC.

Por fim agradeço aos meus amigos Lucas Daniel e Marcos Rogério por me ajudarem no CAD deste trabalho nos momentos que mais precisei.

Se você quer ser bem-sucedido, precisa ter dedicação total, buscar o seu ultimo limite e dar o melhor de sí (SENNÁ, 1994).

## RESUMO

Esse trabalho visou realizar uma convergência de estudos da aerodinâmica com a dinâmica veicular e da utilização de uma análise numérica em CFD (Métodos Computacionais de Dinâmica de Fluidos) para averiguar a influência da asa traseira em de carros de alta performance, no presente trabalho, carros de F1. Os estudos feitos para a análise da frenagem e escorregamento foram com base em um perfil de aerofólio, sendo ele o NACA 2412, assim como o mecanismo Drag Reduction System(DRS) para as variações do ângulo, que vai de  $20^\circ$  e  $0^\circ$ . Antes da geração de resultados foi necessário um refino da malha para convergência dos dados do coeficiente de sustentação, do coeficiente de arrasto e do momento de arfagem. O modelo adotado de dinâmica veicular para o estudo da foi o modelo quase-estático e foi realizado o estudo do escoamento para a averiguar a influência da asa traseira no corpo do veículo. A situação de frenagem ocorreu em uma pista hipotética reta, plana e sem efeitos de ventos laterais e a situação do escorregamento ocorreu na pista de Monza na curva La Parabolica, também considerada plana e sem efeitos de ventos laterais. Os softwares utilizados para as análises foram o SolidWorks para geração dos CAD's das asas traseiras, Ansys Fluent 2020 para geração das malhas e obtenção dos dados das cargas aerodinâmicas e por fim o Python para importar os dados até o Excel onde foram inseridas as fórmulas de dinâmica veicular para reações nos pneus durante a frenagem e o escorregamento.

**Palavras-chave:** Veículo de alto desempenho, Estabilidade, Frenagem, Escorregamento, Cargas aerodinâmicas, Sistema de redução de arrasto, CFD.

## ABSTRACT

This work aimed to converge studies of aerodynamics with vehicle dynamics and utilize numerical analysis in CFD (Computational Fluid Dynamics) to investigate the influence of the rear wing on high-performance cars, specifically Formula One cars. The studies conducted for braking and sliding analysis were based on an airfoil profile, namely the NACA 2412, as well as the Drag Reduction System (DRS) mechanism for angle variations ranging from 20° to 0°. Before generating results, mesh refinement was necessary to converge the data for lift coefficient, drag coefficient, and pitch moment. The adopted vehicle dynamics model for the study was the quasi-static model, and flow analysis was conducted to investigate the influence of the rear wing on the vehicle body. The braking situation occurred on a hypothetical straight, flat track without crosswinds, and the sliding situation occurred on the Monza track at the La Parabolica curve, also considered flat and without crosswinds. The software used for the analysis included SolidWorks for generating CADs of the rear wings, Ansys Fluent 2020 for mesh generation and obtaining aerodynamic load data, and finally Python for importing the data into Excel, where vehicle dynamics formulas for tire reactions during braking and sliding were implemented.

**Keywords:** High performance vehicle, Stability , Braking, Sliding, Aerodynamic loads, Drag Reduction System, CFD.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Determinação da área da seção transversal por projeção da sombra do veículo. . . . .	15
Figura 2 – Definição Aerofólio. . . . .	16
Figura 3 – Ângulo de Ataque e Corda. . . . .	17
Figura 4 – Modelo diagramático de um veículo em movimento. . . . .	18
Figura 5 – Modelo Diagramático de um Veículo em Frenagem. . . . .	19
Figura 6 – Pista de Monza. . . . .	24
Figura 7 – CAD das Asas Traseiras. . . . .	24
Figura 8 – Modelo de referência do CAD do Carro F1 Simplificado e Simetria. . . . .	25
Figura 9 – Detalhamento da Corda da Asa sem DRS. . . . .	25
Figura 10 – Região Detalhada da Malha Próxima a Asa Traseira. . . . .	27
Figura 11 – Região da Malha no Dominio. . . . .	28
Figura 12 – Referência dos Dados para o Modelo. . . . .	29
Figura 13 – $C_L$ Modelo de referência para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	29
Figura 14 – $C_D$ Modelo de referência para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	30
Figura 15 – $C_P$ Modelo de referência para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	30
Figura 16 – $C_L$ Modelo de referência para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	31
Figura 17 – $C_D$ Modelo de referência para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	31
Figura 18 – $C_D$ Modelo de referência para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	32
Figura 19 – $C_L$ Geometria Combinada com o DRS para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	32
Figura 20 – $C_D$ Geometria Combinada com o DRS para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	33
Figura 21 – $C_P$ Geometria Combinada com o DRS para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	33
Figura 22 – $C_L$ Geometria Combinada com o DRS para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	34
Figura 23 – $C_D$ Geometria Combinada com o DRS para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	34
Figura 24 – $C_P$ Geometria Combinada com o DRS para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	35
Figura 25 – $C_L$ Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	35
Figura 26 – $C_D$ Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	36
Figura 27 – $C_P$ Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds = $1,7x10^6$ . . . . .	36
Figura 28 – $C_L$ Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	37
Figura 29 – $C_D$ Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	37
Figura 30 – $C_P$ Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds = $3,4x10^6$ . . . . .	38
Figura 31 – Linhas de Fluxo do Modelo Referência. . . . .	40
Figura 32 – Linhas de Fluxo com DRS. . . . .	40
Figura 33 – Linhas de Fluxo sem DRS. . . . .	40
Figura 34 – Distribuição de Pressão na Asa com DRS. . . . .	41

Figura 35 – Distribuição de Pressão na Asa com DRS. . . . .	41
Figura 36 – Distribuição de Pressão na Asa sem DRS. . . . .	41
Figura 37 – Distribuição da Velocidade Modelo de Referência. . . . .	42
Figura 38 – Distribuição da Velocidade com DRS. . . . .	42
Figura 39 – Distribuição da Velocidade sem DRS. . . . .	42
Figura 40 – Destaque Gradiente da Velocidade e Pressão com e sem DRS. . . .	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Condições de Entrada no Excel - Autor (2023) . . . . .	26
Tabela 2 – Condições de Entrada no Excel Continuação - Autor (2023) . . . . .	26
Tabela 3 – Condições de Contorno Malha não Refinada - Autor (2023) . . . . .	26
Tabela 4 – Condições de Contorno Malha Refinada - Autor (2023) . . . . .	27
Tabela 5 – Comparação de Elementos nos Tipos de Malha - Autor (2023) . . . . .	39
Tabela 6 – Sustentação e Arrasto $Re_L = 1,7x10^6$ - Autor (2023) . . . . .	43
Tabela 7 – Sustentação e Arrasto $Re_L = 3,4x10^6$ - Autor (2023) . . . . .	43
Tabela 8 – Reações nos Pneus e Frenagem $Re_L = 1,7x10^6$ - Autor (2023) . . . . .	44
Tabela 9 – Reações nos Pneus e Frenagem $Re_L = 3,4x10^6$ - Autor (2023) . . . . .	45
Tabela 10 – Situação de Escorregamento em $Re_L = 1,7x10^6$ - Autor (2023) . . . . .	45
Tabela 11 – Situação de Escorregamento em $Re_L = 1,7x10^6$ - Autor (2023) . . . . .	45

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_z$  - Força de Sustentação

$C_z$  - Coeficiente de Sustentação

$\rho$  - Densidade do Ar

$A$  - Área Frontal do Carro

$V_\infty$  - Velocidade do Escoamento

$Re_L$  - Número de Reynolds

$Q'_I$  - Força de Inercia na Translação

$f$  - Coeficiente de atrito ao rolamento

$G$  - Peso do veículo

$\alpha_{pista}$  - Inclinação da pista

$\alpha$  - Ângulo de Ataque

$x$  - Coeficiente de Atrito ao Rolamento

$h$  - Altura do Centro de Gravidade

$l$  - Distância entre Eixos

$M_L$  - Momento de Arfagem

$U$  - Média das Velocidades do fluido

$I$  - Intensidade da turbulência

$u'$  - Raiz Quadrada da Média das Flutuações de Velocidade Turbulenta

$\mu$  - Coeficiente de Atrito entre o Pneu e a Pista

$C_\mu$  - Constante do Modelo de Turbulência

$l_{esc}$  - Escala de Comprimento para Energia em um Fluxo Turbulento

$\nu_t$  - Viscosidade

$F_I$  - Força de Inercia atuando no sentido contrário ao movimento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivo	13
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>13</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>14</b>
2.1	Aerodinâmica Veicular	14
<b>2.1.1</b>	<b>Princípio de Bernoulli</b>	<b>14</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Área da Seção Transversal</b>	<b>14</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Força de Arrasto</b>	<b>14</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Força de Sustentação</b>	<b>15</b>
<b>2.1.5</b>	<b>Número de Reynolds</b>	<b>15</b>
<b>2.1.6</b>	<b>Escoamento Incompressível</b>	<b>16</b>
<b>2.1.7</b>	<b>Aerofólio</b>	<b>16</b>
<b>2.1.8</b>	<b>Corda</b>	<b>17</b>
<b>2.1.9</b>	<b>Ângulo de Ataque</b>	<b>17</b>
2.2	Estabilidade Veicular	17
<b>2.2.1</b>	<b>Resistência a Inercia</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Resistência ao Rolamento</b>	<b>18</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Carga nos Eixos</b>	<b>18</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Carga nos Eixos com o Veículo em Frenagem</b>	<b>19</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Transferência de Carga</b>	<b>19</b>
<b>2.2.6</b>	<b>Freio nas Quatro Rodas</b>	<b>20</b>
<b>2.2.7</b>	<b>Desaceleração</b>	<b>20</b>
<b>2.2.8</b>	<b>Escorregamento</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODOLOGIA</b>	<b>21</b>
3.1	Equação Governamental	21
3.2	Método Numérico	21
<b>3.2.1</b>	<b>Modelo k-Epsilon</b>	<b>21</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Modelo Realizable k-Epsilon</b>	<b>22</b>
3.3	Estudo de Caso	23
3.4	Domínio Computacional e Malha	26
3.5	Validação e Convergência	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>39</b>
4.1	Malha	39

4.2	Comportamento Asa e Corpo . . . . .	39
4.2.1	<b>Distribuição de Pressão Estática Baixo Reynolds</b> . . . . .	<b>41</b>
4.2.2	<b>Distribuição de Velocidade</b> . . . . .	<b>42</b>
4.3	Reações nos Pneus e Frenagem . . . . .	43
5	<b>CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>46</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>47</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No ano de 1950 iniciou o principal evento competição de corrida de automóveis, onde a FIA (2022a) reuniu as maiores empresas do automobilismo para formarem equipes para a realização da primeira corrida oficial da Fórmula 1. Nesse mesmo período, os motores da F1 a partir dos anos 1960 passaram de motores pequenos, 1,5 L e baixa potência, para motores de 3 L e a potência chegava a até 450 cavalos (MOTORSPORT, 2018).

Na época, a falta de tração e aderência nos pneus devido ao aumento da velocidade, acarretavam em tempos grandes e voltas lentas por conta da instabilidade nos carros. Então, com a urgência de desenvolver novas tecnologias para melhorar a eficiência, performance e principalmente a estabilidade dos carros F1 nas curvas, conforme Motorsport (2018), começaram as primeiras inovações no ramo da aerodinâmica na F1, onde em 1968 Colin Chapman implementou a primeira asa traseira no Lotus 49 no Grande Prêmio de Mônaco.

Os anos posteriores, com o desenvolvimento de túneis de ventos sofisticados e o começo da utilização da mecânica dos fluídos computacional para modelagem de geometrias das asas que seriam adequadas aos carros além do desenvolvimento dos melhores perfis de aerofólio, se iniciou as soluções aerodinâmicas para os veículos que competiam no F1. Pesquisas sobre a influência que a asa traseira tem para gerar o Downforce e consequentemente aumentar a estabilidade dos carros de alta performance são vistas no (KATZ, 2006, p. 35), através da iteração da asa com os componentes para dois diferentes carros de alta performance.

Segundo a (ANAC, 2011), o aerofólio é um corpo de forma destinada a produzir uma reação aerodinâmica normal à direção do movimento relativo, como no caso deste trabalho, uma asa. Inicialmente sua utilização começou na aviação, sendo considerado o "coração" dos aviões (RAYMER, 2018). Entretanto, enquanto na aviação os aerofólios vinham com o intuito de gerar mais sustentação, aumentando o ângulo de Estol e consequentemente manter o avião voando, nos carros F1 o objetivo era o manter no chão a partir da sustentação negativa ou downforce.

Nesta perspectiva o trabalho tem o objetivo analisar as influências que a asa traseira dos carros F1 tem na frenagem e escorregamento, utilizando as regulamentações técnicas do Fórmula 1 2022 para referência para modelagem da asa (FIA, 2022b). A metodologia vai adotar análise em Computational Fluid Dynamics utilizando o Ansys Fluent Student e avaliação do escoamento e obtenção dos dados aerodinâmicos do F1-75, veículo da Ferrari no F1 de 2022, com e sem a asa traseira.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo Geral

Identificar a influência da asa traseira na frenagem e escorregamento dos carros da F1 com o aumento da velocidade.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o escoamento que passa pelo veículo, assim identificando as relações físicas que ocorrem no mesmo;
- Obter as forças que agem ao longo de todo perfil aerodinâmico do automóvel;
- Analisar a influência da asa traseira de acordo com essas forças atuantes no carro.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 AERODINÂMICA VEICULAR**

Segundo Nicolazzi (2012, p.53), o escoamento de ar que passa por um veículo, afeta diretamente todos os componentes gerando uma pressão dinâmica. Levando em consideração um veículo não-inercial, tem-se três tipos de forças agindo sobre o veículo. A força peso, a força normal agindo sobre os pneus decorrente da força peso e pôr fim a força de pressão agindo no veículo devido ao escoamento, que aumenta com o aumento da velocidade.

Para carros da F1 que estão em altas velocidade o tempo inteiro, tem-se uma exigência de uma grande performance dos automóveis durante toda corrida e por isso essas forças de pressão decorrentes do escoamento necessitam de uma atenção especial para manter a estabilidade dos carros e segurança dos pilotos. Para Nicolazzi (2012) essas forças podem ser separadas em dois tipos de forças aerodinâmicas: Forças de arrasto e sustentação.

#### **2.1.1 Princípio de Bernoulli**

De acordo com a equação de Bernoulli, a pressão total (estática mais dinâmica) ao longo de uma linha de corrente subsônica permanece constante. Se a velocidade do ar local aumenta, a pressão dinâmica aumentou, então a pressão estática deve diminuir. Da mesma forma, uma redução na velocidade do ar local leva a um aumento na pressão estática (RAYMER, 2018, p.391).

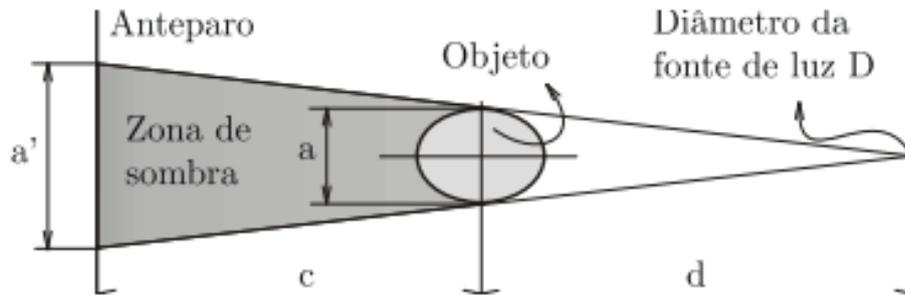
#### **2.1.2 Área da Seção Transversal**

Para determinação da força de arrasto em veículos, tem-se interesse na maior área projetada da seção transversal do mesmo na direção do movimento. Uma maneira de se obter, de acordo com Nicolazzi (2012) é o método experimental que faz uso da projeção da área sobre uma parede vertical. A Figura 1 demonstra o método.

#### **2.1.3 Força de Arrasto**

Na Força de Arrasto, o arrasto é a força imposta pelo ar que age de forma oposta à trajetória do movimento do veículo e para Nicolazzi (2012), pode ser expresso na Equação 1:

Figura 1 – Determinação da área da seção transversal por projeção da sombra do veículo.



Fonte: Nicolazzi (2012, p.58)

$$F_x = -\frac{1}{2}C_x\rho AV_\infty^2 \quad (1)$$

Entretanto, devido às maneiras com que o fluido interage paralelamente ao veículo, e desse arrasto de maneira mais específica é importante analisar o arrasto especificamente, separando-os em dois tipos quando analisados em 2D, o Arrasto de Pele e o Arrasto de Pressão:

- Arrasto de Pele - Força necessária para superar a viscosidade e puxar esse ar da camada limite na direção em que a aeronave está viajando produz arrasto de atrito superficial (RAYMER, 2018, p.391).
- Arrasto de Pressão - Forças de pressão que produzem arrasto através da separação da viscosidade (RAYMER, 2018, p. 393).

#### 2.1.4 Força de Sustentação

Sustentação é a força que atua em um veículo normal à velocidade do fluxo livre e pode ser expresso na Equação 2:

$$F_z = \frac{1}{2}C_z\rho AV_\infty^2 \quad (2)$$

No caso, a força vertical adotada para análise de sustentação dos carros F1 é chamada de Downforce, que segundo Katz (2006), pode se obter com a utilização de uma asa invertida nos veículos automotivos.

#### 2.1.5 Número de Reynolds

O número de Reynolds pode ser definido como o parâmetro de partida para a análise do tipo de escoamento e sua natureza. O número de Reynolds pode ser

definido pela Equação 3, como sendo Çengel (2013):

$$Re_L = \frac{\rho V_\infty L}{\mu} \quad (3)$$

$Re_L$  define, portanto, se a natureza do escoamento é laminar, turbulento ou de transição. Assim, as equações governantes desse tipo de escoamento podem ser definidas.

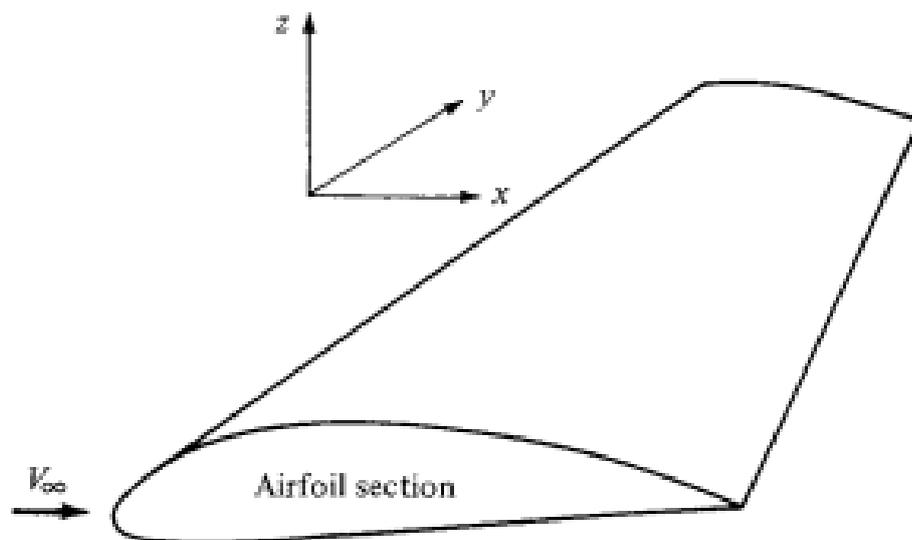
### 2.1.6 Escoamento Incompressível

De acordo com Çengel (2013), um escoamento é classificado como compressível ou incompressível dependendo do nível de variação da densidade durante o escoamento. A incompressibilidade é uma aproximação, e um escoamento é dito ser incompressível se a densidade permanecer aproximadamente constante em todos os lugares. Portanto, o volume de cada porção do fluido permanece inalterado durante o decorrer de seu movimento quando o escoamento (ou o fluido) for incompressível.

### 2.1.7 Aerofólio

Conforme Anderson (2011), uma asa desenhada em perspectiva da Figura 4.6. A asa se estende na direção  $y$ . A velocidade do fluxo livre  $V$  é paralela ao plano  $xz$ . Qualquer seção da asa cortada por um plano paralelo ao plano  $xz$  é chamada de aerofólio.

Figura 2 – Definição Aerofólio.

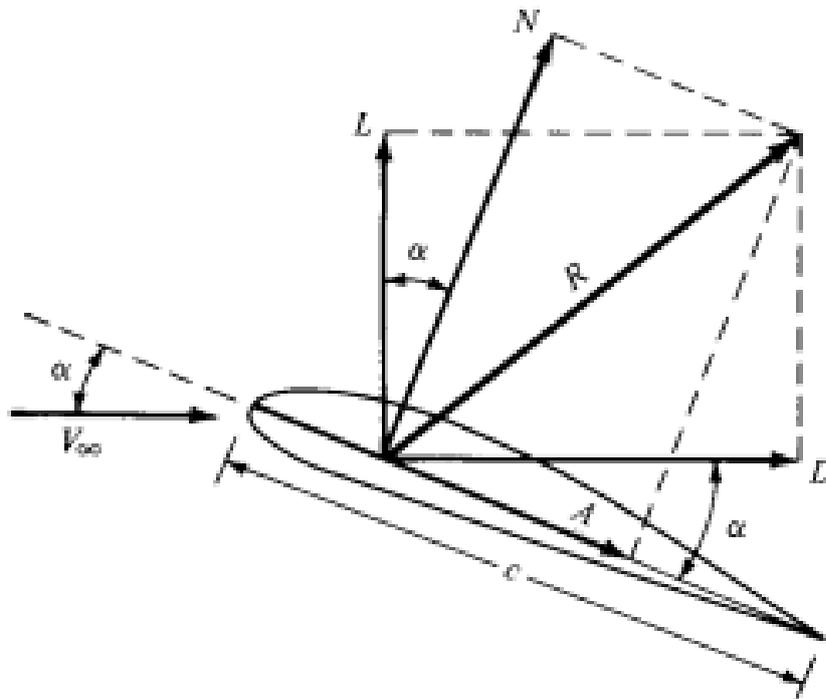


Fonte: Anderson (2011, p.316)

### 2.1.8 Corda

De acordo com Anderson (2011), A corda  $c$  é a distância linear do bordo de ataque ao bordo de fuga do corpo onde a Figura 3 exemplifica isso.

Figura 3 – Ângulo de Ataque e Corda.



Fonte: Anderson (2011, p.20)

### 2.1.9 Ângulo de Ataque

Também pela Figura 3 se tem o ângulo de ataque  $\alpha$ , que é definido como o ângulo entre  $c$  e  $V_\infty$ . Assim,  $\alpha$  é também o ângulo entre  $F_z$  e  $N$  e entre  $F_x$  e  $A$  (ANDERSON, 2011).

## 2.2 ESTABILIDADE VEICULAR

A estabilidade é caracterizada quando um corpo após sofrer uma perturbação, tende retornar ao seu estado original. Quando se trata de automóveis, o objeto de estudo se volta para perturbações transversais de pequena ou longa duração e essas perturbações de acordo com Nicolazzi (2012), podem ser originadas de diversas maneiras, como:

### 2.2.1 Resistência a Inércia

Para um corpo ter o seu estado de movimento alterado, é necessário aplicar uma força. Para um automóvel, que é um conjunto de inércias em translação e rotação, de acordo com Nicolazzi (2012) se torna necessário levar em consideração as massas de translação e rotação. O cálculo da massa de translação é:

$$Q'_I = ma \quad (4)$$

### 2.2.2 Resistência ao Rolamento

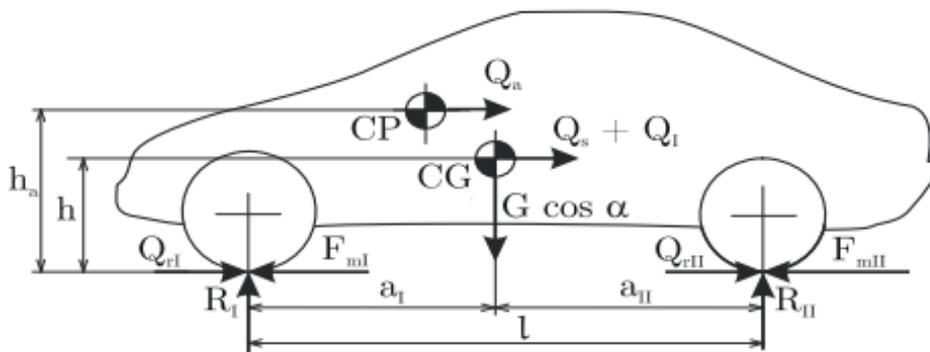
A resistência ao rolamento é devida as perdas no par paneu pista (NICOLAZZI, 2012). Essa pode ser calculada pela expressão empírica abaixo:

$$Q_r = fG\cos\alpha \quad (5)$$

### 2.2.3 Carga nos Eixos

Visto as outras forças acima, além do peso, que agem no ponto de contato pneu-pista, no centro de gravidade e no centro de pressão, ocasionando uma alteração sensível na componente de força normal do solo, assim as resistências ao movimento modificam as cargas nos eixos de um veículo como aquele representado na Figura 4 .

Figura 4 – Modelo diagramático de um veículo em movimento.



Fonte: Nicolazzi (2012, p.74)

Assim, para quantificar a variação da carga normal ao solo, da aplicação das condições de equilíbrio no plano se tem:

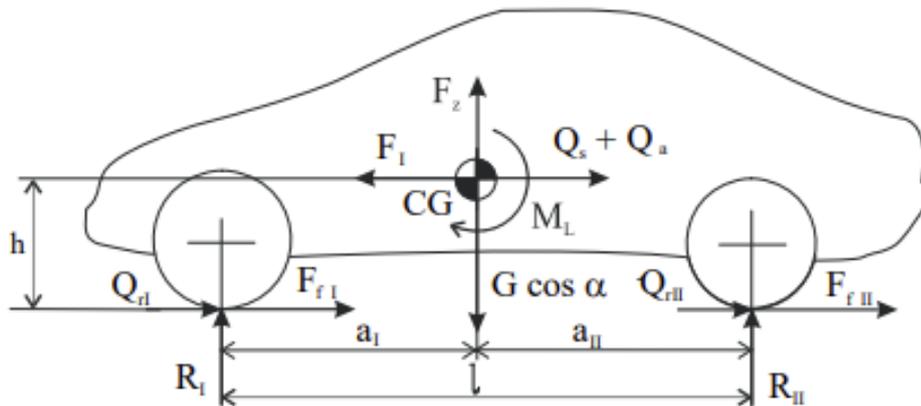
$$R_I = (1 - x)(G\cos\alpha - F_z) - (Q_a + Q_I + Q_S)\frac{h}{l} - \frac{M_L}{l} \quad (6)$$

$$R_{II} = x(G\cos\alpha - F_z) + (Q_a + Q_I + Q_S)\frac{h}{l} + \frac{M_L}{l} \quad (7)$$

### 2.2.4 Carga nos Eixos com o Veículo em Frenagem

As resistências ao movimento alteram as reações dos pneus em relação ao solo quando o veículo se desloca. Como o veículo durante a frenagem está em movimento, esse efeito também se manifesta. A modelagem que é desenvolvida a seguir é bastante semelhante àquela desenvolvida no curso citado.

Figura 5 – Modelo Diagramático de um Veículo em Frenagem.



Fonte: Nicolazzi (2012, p.93)

As diferenças, conforme mostra a Figura 5, estão por conta de se ter força de frenagem em vez de força motriz e do sentido da força de inércia mudar. Então se tem as expressões:

$$R_I = (1 - x)(G \cos \alpha - F_z) - (Q_a + Q_s - F_I) \frac{h}{l} - \frac{M_L}{l} \quad (8)$$

$$R_{II} = x(G \cos \alpha - F_z) + (Q_a + Q_s - F_I) \frac{h}{l} + \frac{M_L}{l} \quad (9)$$

Onde:

### 2.2.5 Transferência de Carga

Durante a frenagem, existe a transferência de carga entre os eixos e essa transferência pode ser descrita de acordo com Nicolazzi (2012) como:

$$\Delta G = (Q_a + Q_s - F_I) \frac{h}{l} \quad (10)$$

Reparando que essa expressão está descrita nas reações de carga nos eixos durante a frenagem.

### 2.2.6 Freio nas Quatro Rodas

Existem três casos de freios nas rodas, que segundo Nicolazzi (2012) são:

- Freio na dianteira
- Freio na traseira
- Freio nas quatro rodas

No presente trabalho será abordado a situação do freio nas quatro rodas, que é expresso como:

$$F_f = \mu(R_I + R_{II}) \quad (11)$$

O presente modelo será melhor apresentado na metodologia.

### 2.2.7 Desaceleração

A partir das forças de frenagem, é possível o cálculo da desaceleração. Sendo assim, tem-se conforme Nicolazzi (2012):

$$a = \left( \frac{F_f + F_x}{G} + f \right) g \quad (12)$$

Lembrando que o sentido da desaceleração é no sentido do movimento do veículo.

### 2.2.8 Escorregamento

Polígono de estabilidade é a maior figura gerada pelos pontos de contato de um corpo com o solo. Para exemplificar, no caso de um veículo de quatro rodas, com bitola igual dos eixos dianteiro e traseiro, é um retângulo, no caso de um veículo de duas rodas é uma reta (NICOLAZZI, 2012). Com isso, o conceito de escorregamento é de extrema importância para estabilidade tanto em uma reta como em uma curva, onde Nicolazzi (2012) elabora um conceito simplificado a partir do modelo proposto no presente trabalho, para calcular o escorregamento. Para isso seja uma curva de raio  $\rho$  percorrida com uma certa velocidade  $v$  causa uma força centrípeta  $F_c$  no veículo, assim tem-se:

$$F_c = m \frac{v^2}{\rho} \quad (13)$$

Onde se  $F_c \geq (G + L)\mu$  teremos a situação de escorregamento total dos pneus.

Para essa situação, também é viável o cálculo da velocidade máxima, em km/h, da curva para manter a estabilidade. Sendo assim:

$$v \geq 3,6\sqrt{\mu\rho g} \quad (14)$$

Onde valores maiores que a velocidade calculada acima, ocorrerá situações de perda de estabilidade no veículo na curva pelo escorregamento.

### 3 MÉTODOLOGIA

Visto a complexidade e custo de alguns projetos, se tornam necessárias a utilização de ferramentas computacionais para análise numérica deles antes da fabricação do projeto para produto final. No caso da asa traseira de um carro F1 não é diferente, visto que tem o objetivo de aumentar a performance dos veículos em alta velocidade, a importância de saber o comportamento do fluido e as forças agindo em todo corpo do veículo gera uma maior eficiência para a elaboração de um projeto da asa traseira. Por isso, neste trabalho terá uma ênfase na parte da análise numérica.

#### 3.1 EQUAÇÃO GOVERNAMENTAL

A determinação dos efeitos do escoamento do ar na superfície do veículo se dá através das equações de conservação da massa, conservação da quantidade de movimento linear de Navier Stokes, conforme as Equações 7 e 8, respectivamente:

$$\rho \left[ \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} \right] = 0 \quad (15)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u(\partial u)}{\partial x} + \frac{v(\partial u)}{\partial y} + \frac{w(\partial u)}{\partial z} \right) = \rho g x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (16)$$

#### 3.2 MÉTODO NUMÉRICO

Para o trabalhos de análise numérica, existem diversas abordagens numéricas para a solução de Navier-Stokes, o presente trabalho adota metodologia para solução das equações a resolução das equações médias de Reynolds ou RANS(Reynolds Average Navier-Stokes). Conforme Wilcox (1988) esse modelo consegue solucionar com maior rapidez, só que em contra partida com um certo custo na precisão. O modelo de turbulência adotado foi o k-Epsilon Realizable.

##### 3.2.1 Modelo k-Epsilon

As equações de Navier-Stokes são solucionadas através do método de elementos finitos do software Ansys Fluent 2020, utilizando o método RANS com modelo de turbulência de duas equações k-epsilon( $k - \epsilon$ ). Isso significa que, de acordo com Wilcox (1988) além das equações de conservação, ele resolve duas equações de transporte (PDEs), que levam em conta os efeitos históricos como convecção e difusão de energia turbulenta. As duas variáveis transportadas são a energia cinética turbulenta ( $k$ ), que determina a energia na turbulência, e a taxa de dissipação turbulenta

( $\epsilon$ ), que determina a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, isso pode ser exemplificado através da equação a seguir:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (17)$$

Onde, a intensidade da turbulência pode ser definida como:

$$I = \frac{u'}{U} \quad (18)$$

Sendo  $u'$ :

$$u' = \sqrt{\frac{3}{2}(u'_{x^2} + u'_{y^2} + u'_{z^2})} \quad (19)$$

E  $U$  pode ser calculado como:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (20)$$

A dissipação pela turbulência pode ser expressa como:

$$\epsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad (21)$$

Sendo que  $C_\mu$  geralmente assume o valor 0,09 e  $l_{esc}$  é a escala de comprimento que descreve o tamanho de grandes redemoinhos contendo energia em um fluxo turbulento.

Por fim a viscosidade é:

$$\nu_t = 0,09 \frac{k^2}{\epsilon} \quad (22)$$

Existem diferentes variações do modelo K-Epsilon, como Standard e o RNG, cada uma com certas modificações para funcionar melhor sob certas condições do fluxo do fluido.

### 3.2.2 Modelo Realizable k-Epsilon

O modelo Realizable será brevemente abordado no presente trabalho, ,ais detalhes do método podem ser encontrados no artigo do professor Riley (2006).

O termo “Realizable” significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas nas tensões de Reynolds, consistentes com a física de fluxos turbulentos. O modelo tem um benefício que ele prevê com mais precisão a taxa de espalhamento de jatos planos e redondos. Também é provável que forneça desempenho superior para fluxos envolvendo rotação, camadas limite sob forte gradientes de pressão, separação e recirculação.

Estudos iniciais mostraram que o modelo realizável fornece o melhor desempenho de todas as versões do modelo k para várias validações de fluxos separados e fluxos com características complexas de fluxo secundário. Para isso, o modelo k-Epsilon Realizable proposto visou demonstrar algumas deficiências dos modelos k tradicionais, adotando os seguintes critérios:

- Uma nova fórmula de viscosidade envolvendo uma variável  $C_\mu$  originalmente proposta por Reynolds
- Um novo modelo de equação para dissipação ( $\epsilon$ ) baseado na equação dinâmica da flutuação da vorticidade quadrática média.

Por fim, uma limitação do modelo k-Epsilon Realizable é que ele produz viscosidades turbulentas não físicas em situações em que o domínio computacional contém zonas de fluido rotativas e estacionárias, por exemplo quadros de referência múltiplos ou malhas deslizantes rotativas. Isso se deve ao fato de que o modelo k-Epsilon Realizable inclui os efeitos da rotação média na definição da viscosidade turbulenta.

### 3.3 ESTUDO DE CASO

O presente trabalho visa estudar a influência da asa traseira na estabilidade de carros F1 enfatizando as reações dos pneus durante a frenagem e a frenagem, para isso foi utilizado um aerofólio NACA 2412 e variações do ângulo de ataque com um modelo de asa Sistema de Redução de Arrasto(DRS).

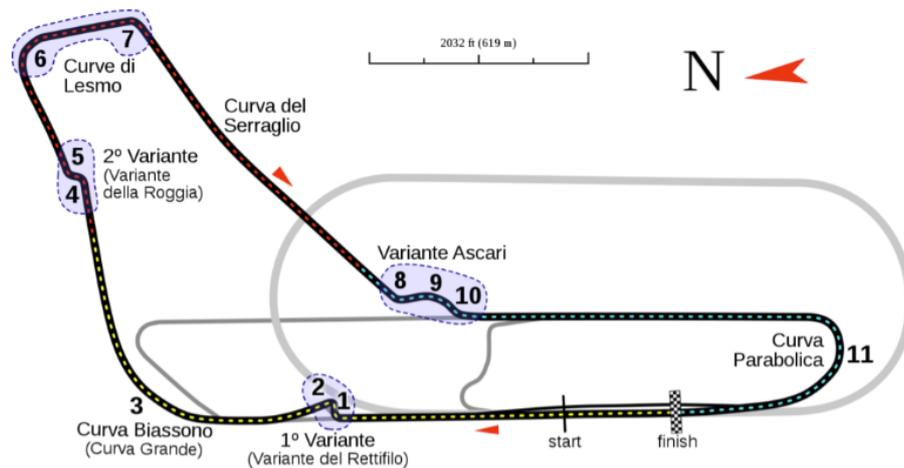
Foi realizado a escolha do modelo quase-estático proposto por Nicolazzi (2012). No presente modelo não são considerados a resistência a inercia em rotação, assim como todas as forças aerodinâmicas atuam no centro de gravidade(CG) do veículo. Também foi adotado uma situação de pista plana, reta e sem ação de ventos laterais, isso é, sem efeitos de forças laterais, resistência ao aclone ou forças perturbadoras para tirar o veículo de sua trajetória. O modelo proposto pode ser revisto nas Figuras 4 e 5.

Foram realizadas simulações em condições de simetria, com  $Re_L = 1,7 \times 10^6$  e  $Re_L = 3,4 \times 10^6$  para verificar a atuação da velocidade junto aos diferentes ângulos de ataque nos resultados da sustentação negativa(Downforce) e do arrasto. Os resultados foram utilizados no desenvolvimento das expressões matemáticas das reações nos pneus durante a frenagem e para a situação de escorregamento na pista La Parabolica em Monza.

A pista La Parabolica em Monza, Figura 6, é uma das curvas de maiores velocidades dos circuitos de Formula 1, onde a curva original tem uma considerável inclinação lateral gerando forças laterais no veículo durante o trajeto. Para o presente trabalho a análise nessa curva se limitará ao escorregamento simplificado proposto pelo modelo de estudo.

A pista possui um amplo raio, permitindo altas velocidades onde a curva possui um traçado histórico que segundo Motor (2021) possui uma inclinação de  $30^\circ$  e um raio de 320m.

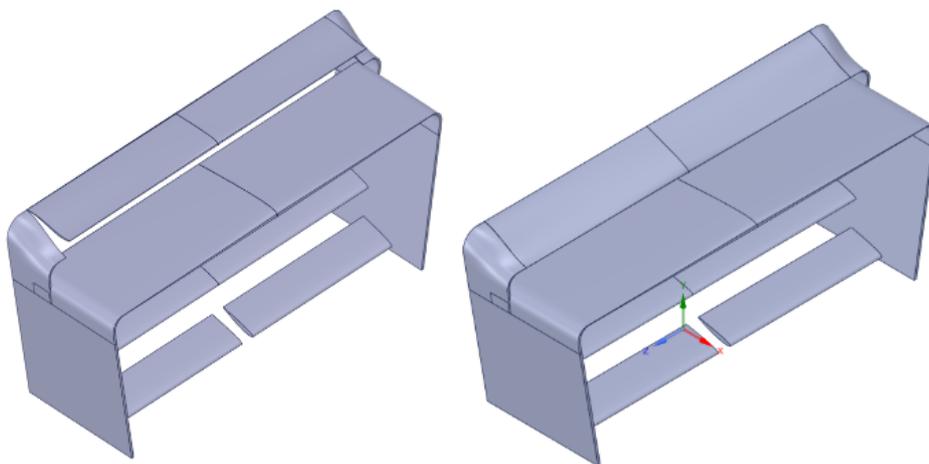
Figura 6 – Pista de Monza.



Fonte: Pellegrini (2018)

Para este trabalho foi utilizado um geometria de F1 F-75 e que foi simplificada pelo Autor (2023) para menor custo computacional e também tratamento de erros da geometria, também foi modelado pelo Autor (2023) uma asa com perfil aerofólio NACA 2412 com comprimento de corda  $c = 600\text{mm}$  na região onde o DRS atua. As geometrias se encontram nas Figuras 8, 7 e 9 e as condições adotadas para os cálculos do Excel foram os da Tabela 1 e 2.

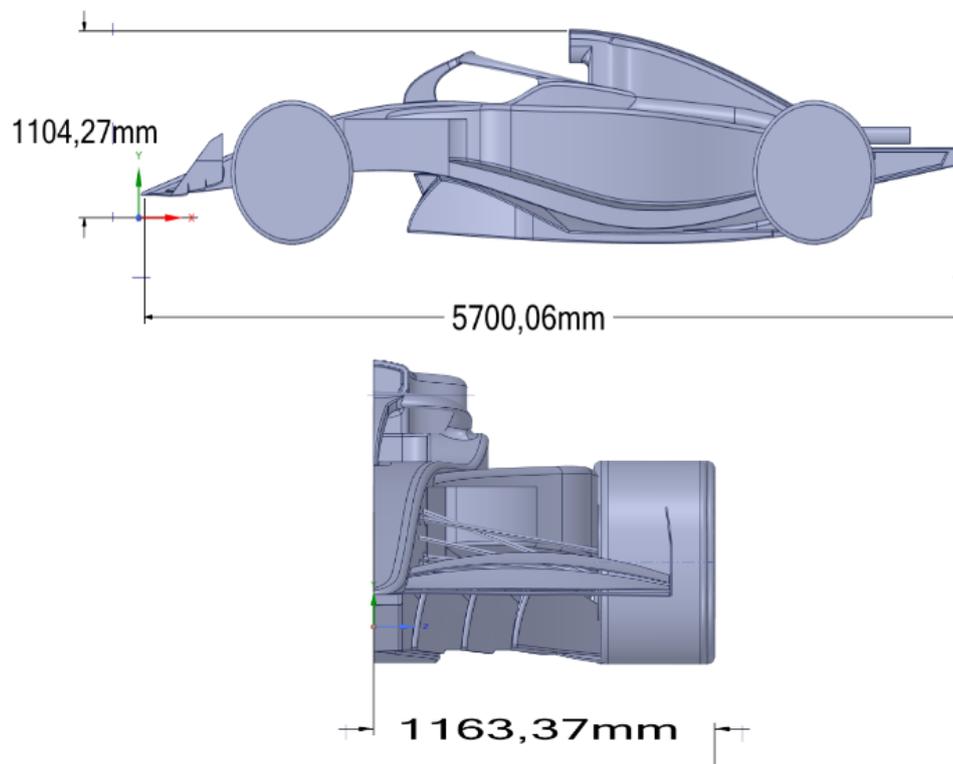
Figura 7 – CAD das Asas Traseiras.



Fonte: Autor (2023)

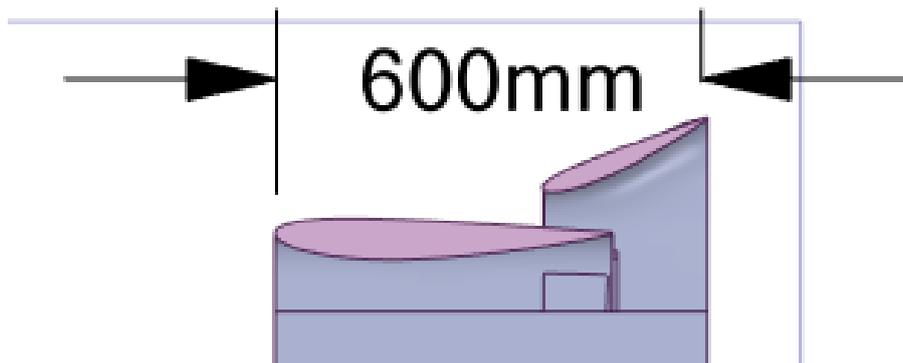
1:

Figura 8 – Modelo de referência do CAD do Carro F1 Simplificado e Simetria.



Fonte: Autor (2023)

Figura 9 – Detalhamento da Corda da Asa sem DRS.



Fonte: Autor (2023)

m(kg)	P(N)	a(m/s <sup>2</sup> )	$Q_I$	$Q_r$	$cg_x$ (m)	$cg_y$ (m)	l(m)	x	$a_1$	$a_2$
795	7800	7,63	564,25	460,76	2,88	0,57	3,71	0,49	1,9	1,9

Tabela 1 – Condições de Entrada no Excel - Autor (2023)

$R_{0I}$	$R_{0II}$	$\mu_0$
4015	3784	0,85

Tabela 2 – Condições de Entrada no Excel Continuação - Autor (2023)

### 3.4 DOMÍNIO COMPUTACIONAL E MALHA

O domínio computacional foi modelado com as geometrias do carro F1 e da asa combinadas no SpaceClaim, centralizada a uma distância suficiente para evitar regiões de recirculação e condições adversas nas fronteiras do domínio computacional, gerando assim erros numéricos. As condições de contorno adotadas foram, Tabelas 3 e 4, onde para a primeira simulação foi adotada a condição não refinada e para as demais a condição refinada com variações na dimensão da malha:

Condição	Tipo
Inlet	Velocidade
Outlet	Pressão
Wind-Tunnel	Parede
Simmetry	Simetria
Moving-Ground	Parede Móvel
Front-Wheel	Parede
Rear-Wheel	Parede
Rear-Wing	Parede
Wall-Car	Parede

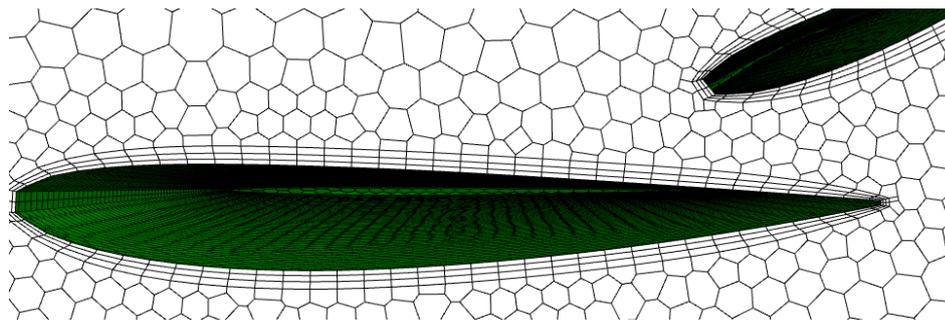
Tabela 3 – Condições de Contorno Malha não Refinada - Autor (2023)

Condição	Tipo
Inlet	Velocidade
Outlet	Pressão
Wind-Tunnel	Parede
Simmetry	Simetria
Moving-Ground	Parede Móvel
Front-Wheel	Parede
Rear-Wheel	Parede
Front-Wing	Parede
Rear-Wing	Parede
Wall-Car	Parede
Refine	Parede

Tabela 4 – Condições de Contorno Malha Refinada - Autor (2023)

Para geração da malha, foi utilizada a Poly-Hexcore. Segundo Mendis (2018), a malha Hexcore e Poly-Hexcore se baseiam na tecnologia de malha aplicando um elemento hexaédrico ao volume. Elementos hexaédricos são computacionalmente eficientes em comparação com tetraédricos e poliédricos, assim reduzindo a contagem de elementos e economizando recursos computacionais sem comprometer a precisão.

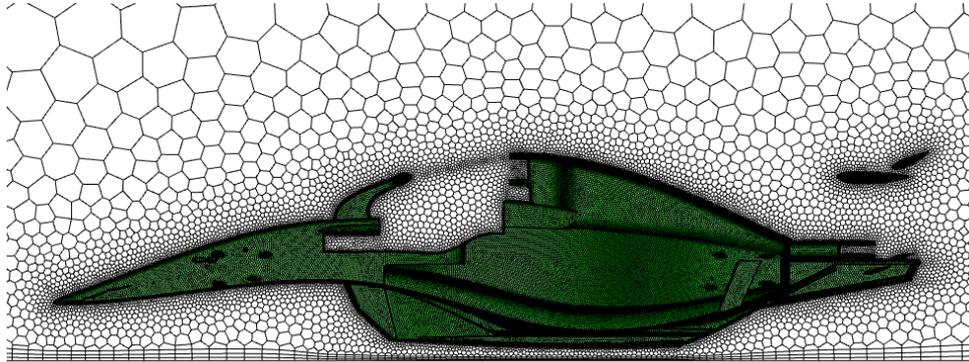
Figura 10 – Região Detalhada da Malha Próxima a Asa Traseira.



Fonte: Autor (2023)

O elemento hexaédrico é aplicado a todo volume, da região da camada limite, com elementos de maior refino visto que é a região de interesse, possibilitando a precisão nos resultados, até a região de fora da camada limite com uma taxa de crescimento que garantem uma transição suave, conforme a Figura 10 e 11

Figura 11 – Região da Malha no Dominio.



Fonte: Autor (2023)

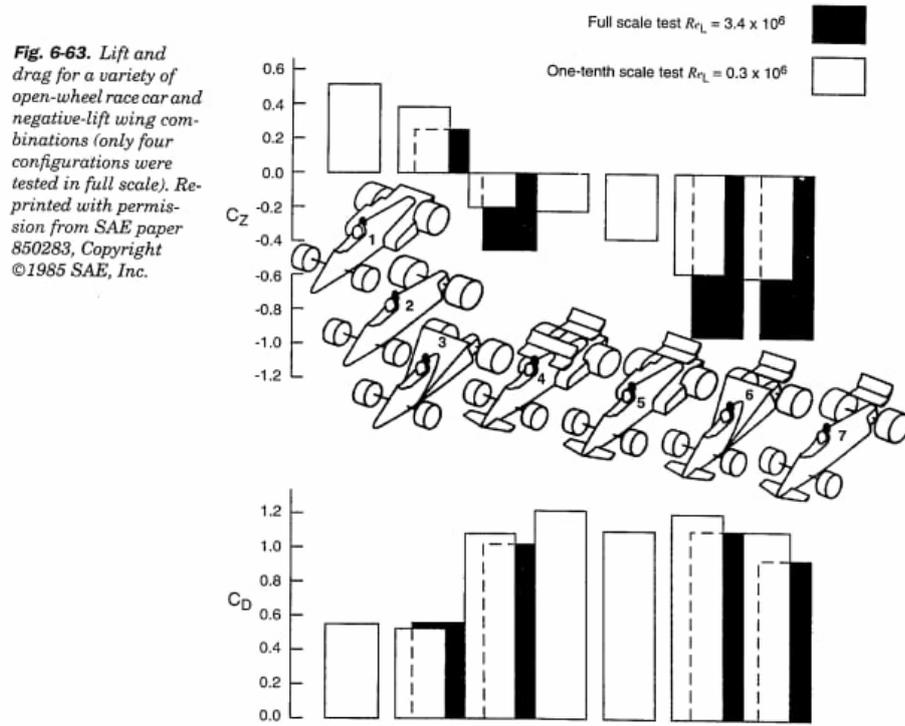
### 3.5 VALIDAÇÃO E CONVERGÊNCIA

A validação do modelo foi feita conforme os resultados do Katz (2006), como mostra a Figura 12. Foi utilizado o modelo 3 apenas com o difusor para validação dos dados, visto que o presente trabalho não trabalhou com a asa frontal não foi possível verificar com os outros modelos. O artigo proposto pela Figura 12 é pago, sendo assim não foi possível verificar o tamanho da corda utilizada e consequentemente a velocidade adotada e por isso no presente trabalho, foi suposto que a geometria e a velocidade adotada no CAD estariam semelhantes aos da referência.

Para a validação foram criadas quatro malhas de menor até maior refino. Como a geometria do carro F1 é uma geometria complexa, não foi possível adotar geração de malha com pouco refino, essa situação gerava erros na criação da malha. Assim, acompanhando os gráficos abaixo se observa a proximidade dos dados da referência com os gerados pelo Ansys Fluyente 2020, assim como mesmo com a discrepância do número de elementos não houve uma grande variação nos valores de  $C_L$  e  $C_D$ , validando também a eficiência na geração das malhas pelo elemento Poly-Hexcore na convergência dos dados.

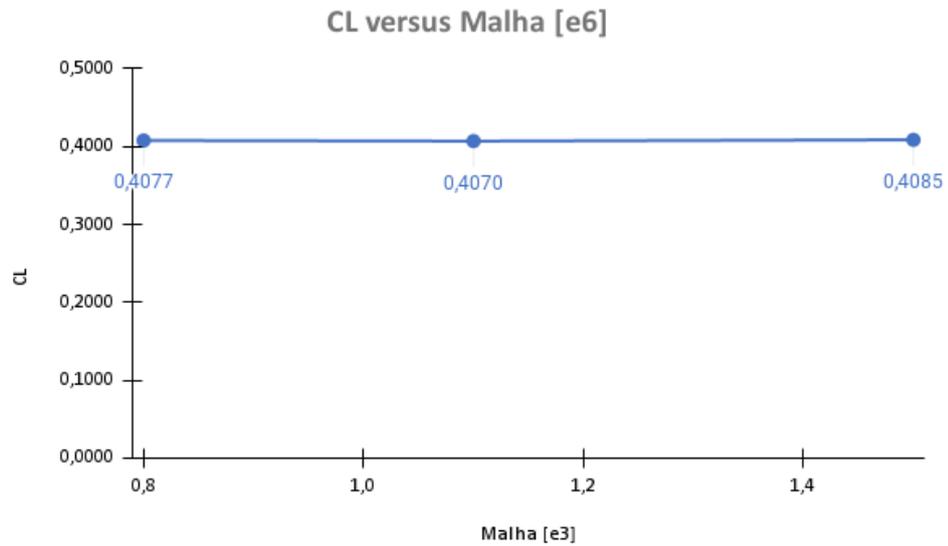
Nos gráficos abaixo também é possível observar a convergência dos dados para os diferentes refinamentos de malha para a situação da geometria do carro F1 combinada com a asa e seus diferentes ângulos de ataque no DRS.

Figura 12 – Referência dos Dados para o Modelo.



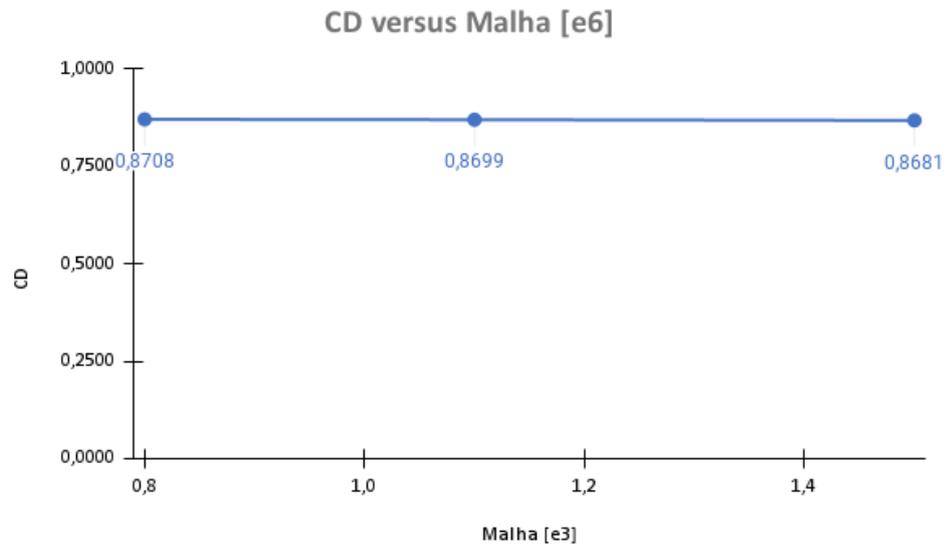
Fonte: Katz (2006, p. 225)

Figura 13 –  $C_L$  Modelo de referência para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .



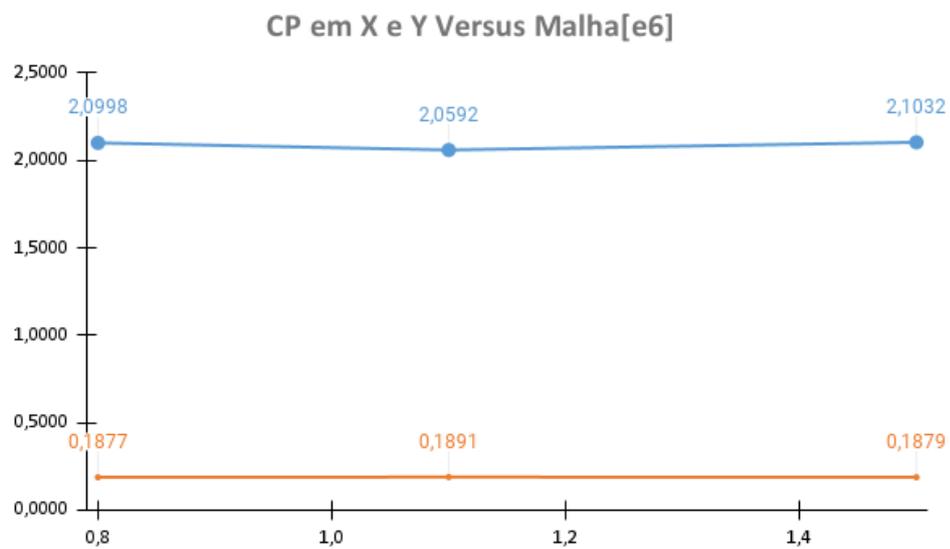
Fonte: Autor (2023)

Figura 14 –  $C_D$  Modelo de referência para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .

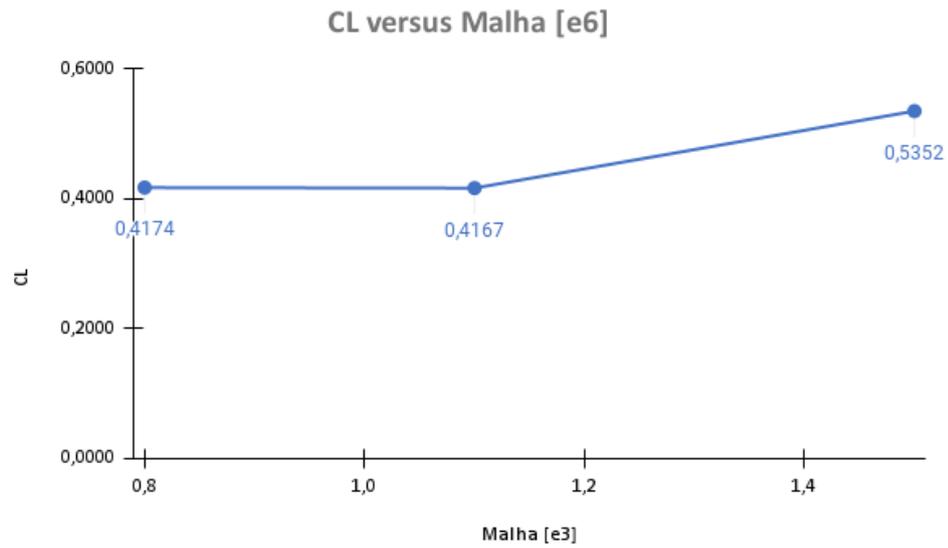


Fonte: Autor (2023)

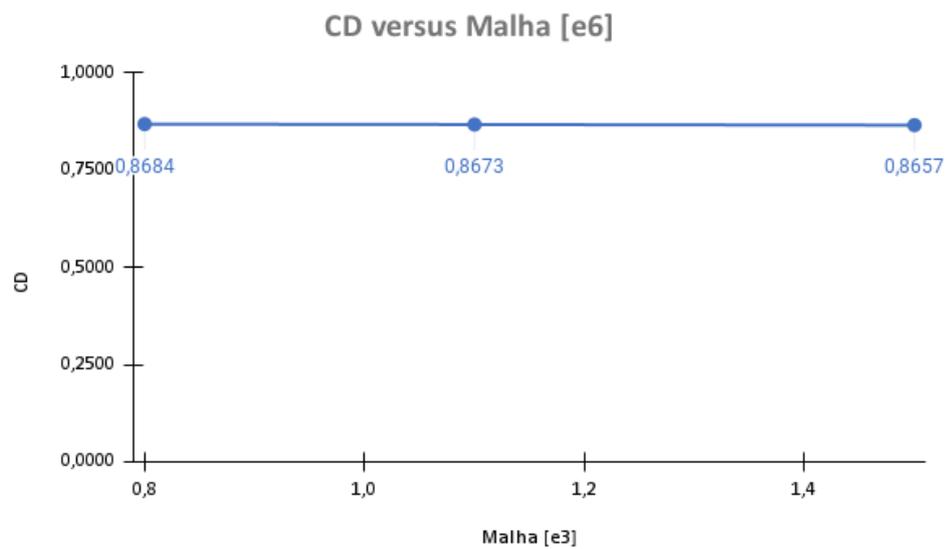
Figura 15 –  $C_P$  Modelo de referência para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .



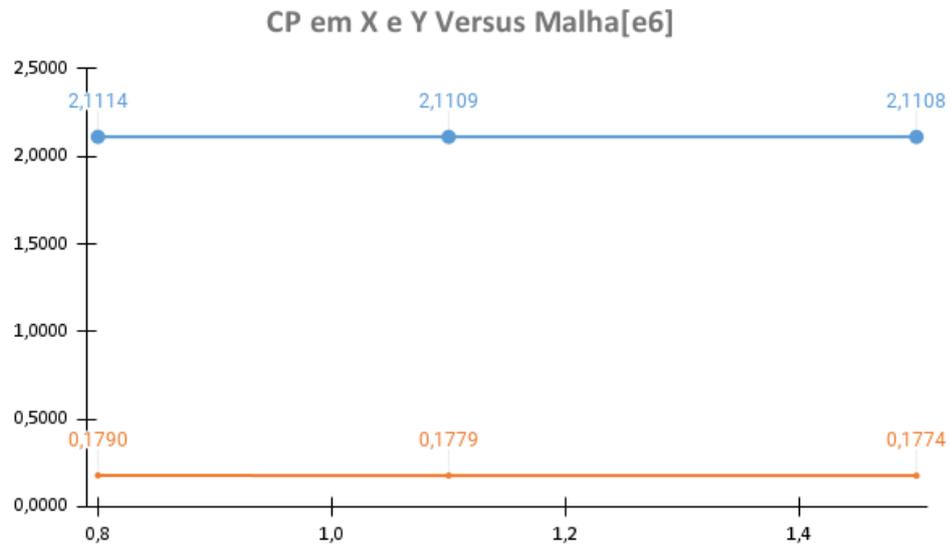
Fonte: Autor (2023)

Figura 16 –  $C_L$  Modelo de referência para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .

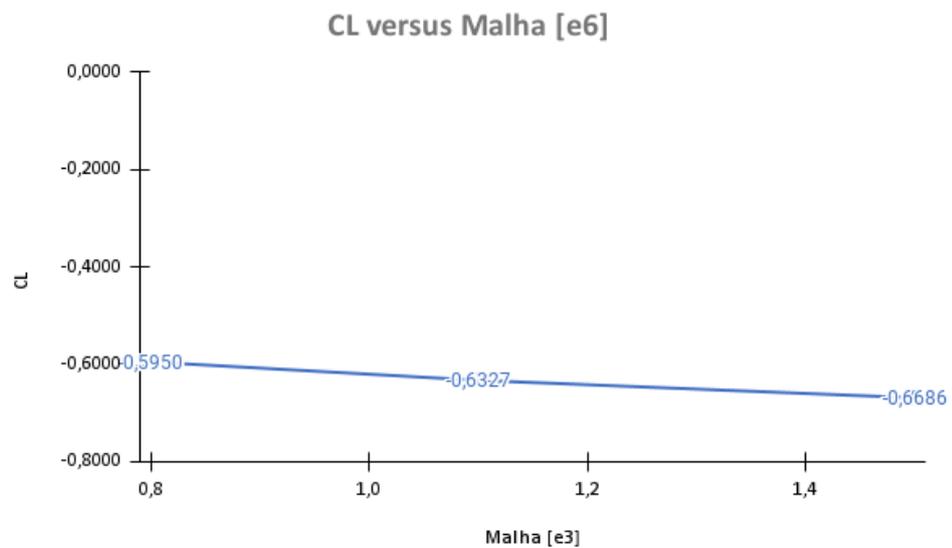
Fonte: Autor (2023)

Figura 17 –  $C_D$  Modelo de referência para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .

Fonte: Autor (2023)

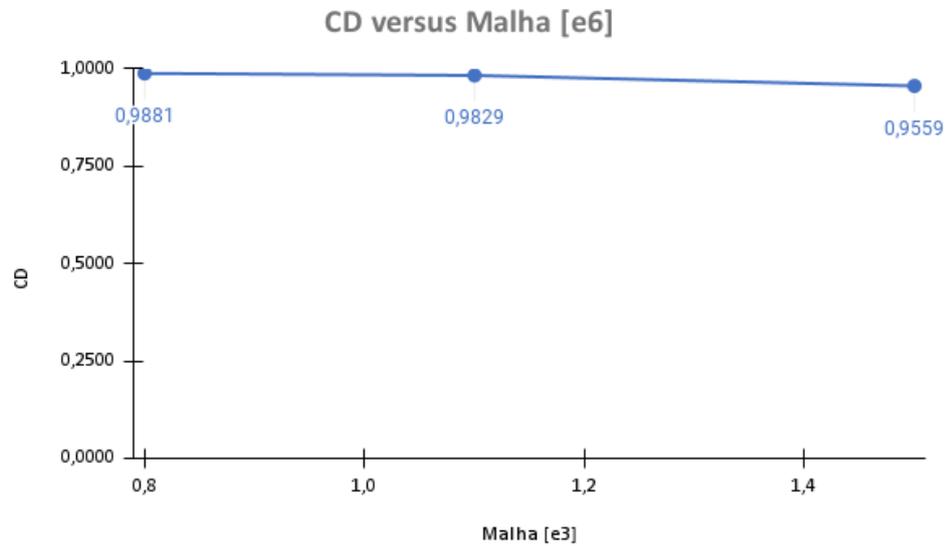
Figura 18 –  $C_D$  Modelo de referência para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .

Fonte: Autor (2023)

Figura 19 –  $C_L$  Geometria Combinada com o DRS para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .

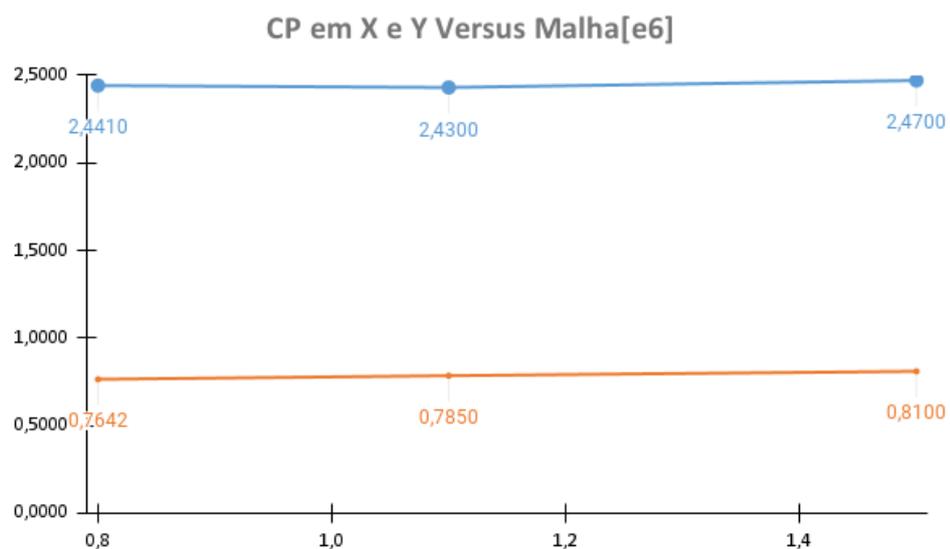
Fonte: Autor (2023)

Figura 20 –  $C_D$  Geometria Combinada com o DRS para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .

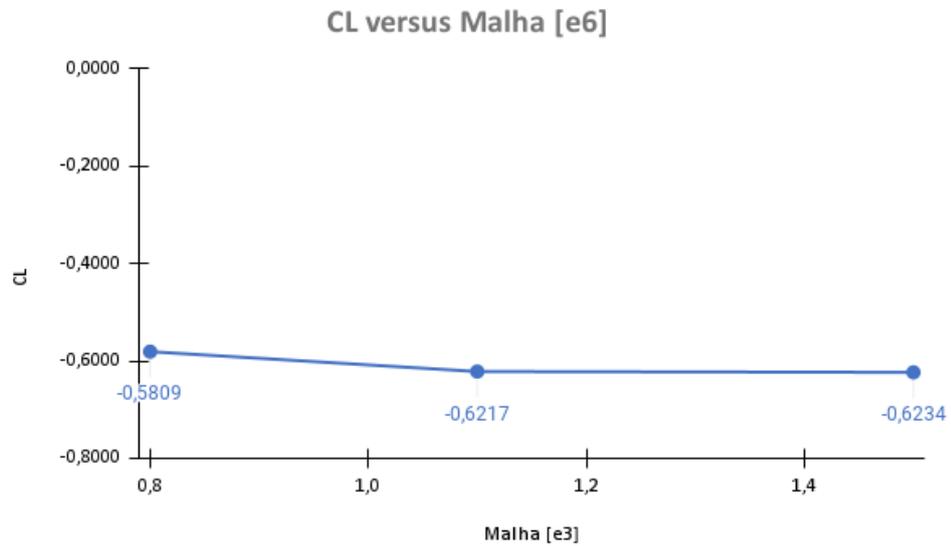


Fonte: Autor (2023)

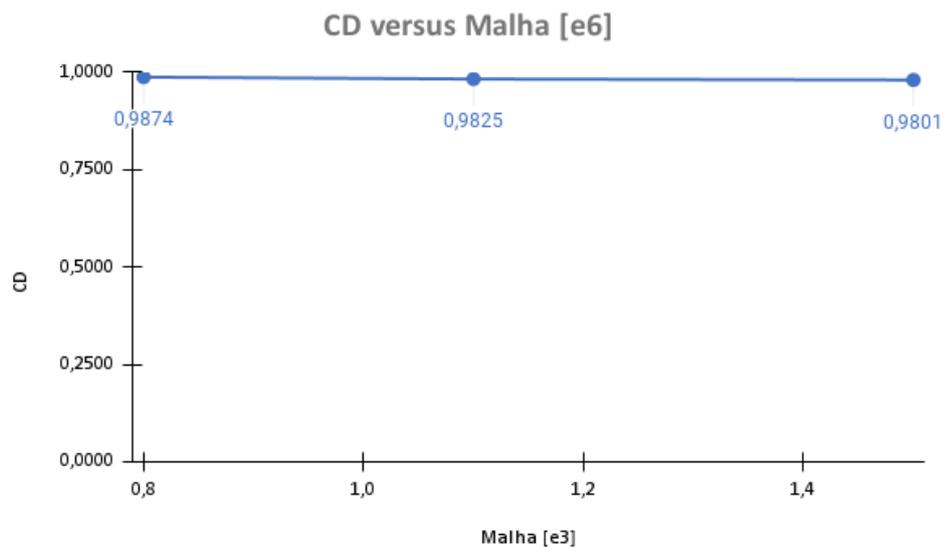
Figura 21 –  $C_P$  Geometria Combinada com o DRS para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .



Fonte: Autor (2023)

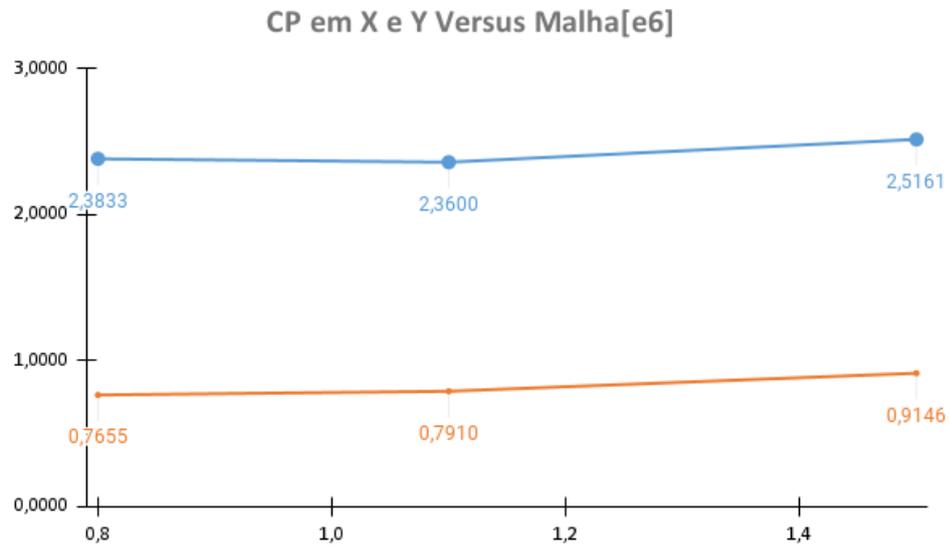
Figura 22 –  $C_L$  Geometria Combinada com o DRS para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .

Fonte: Autor (2023)

Figura 23 –  $C_D$  Geometria Combinada com o DRS para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .

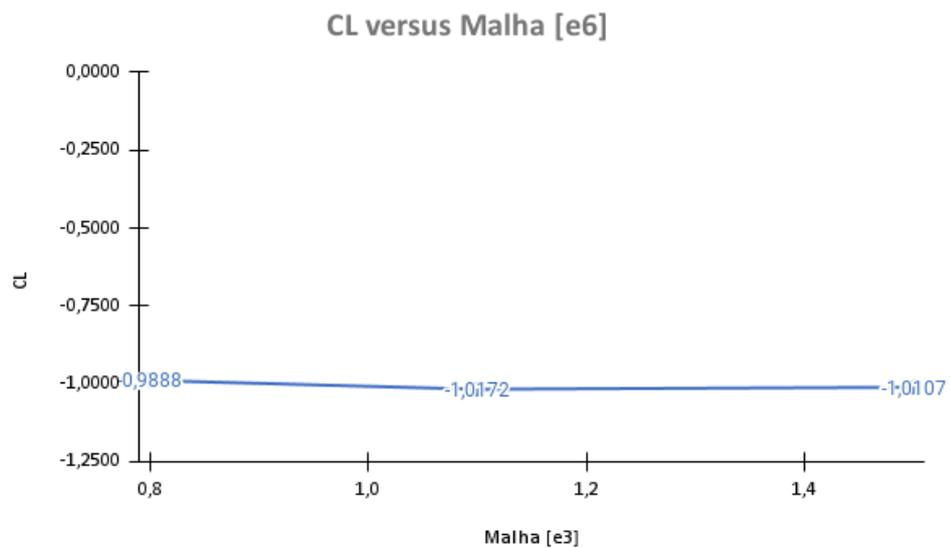
Fonte: Autor (2023)

Figura 24 –  $C_P$  Geometria Combinada com o DRS para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .

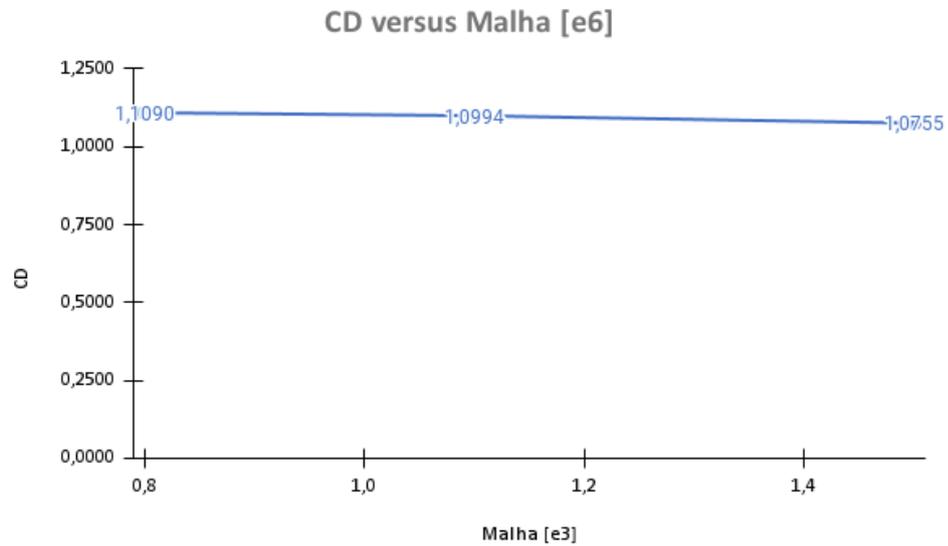


Fonte: Autor (2023)

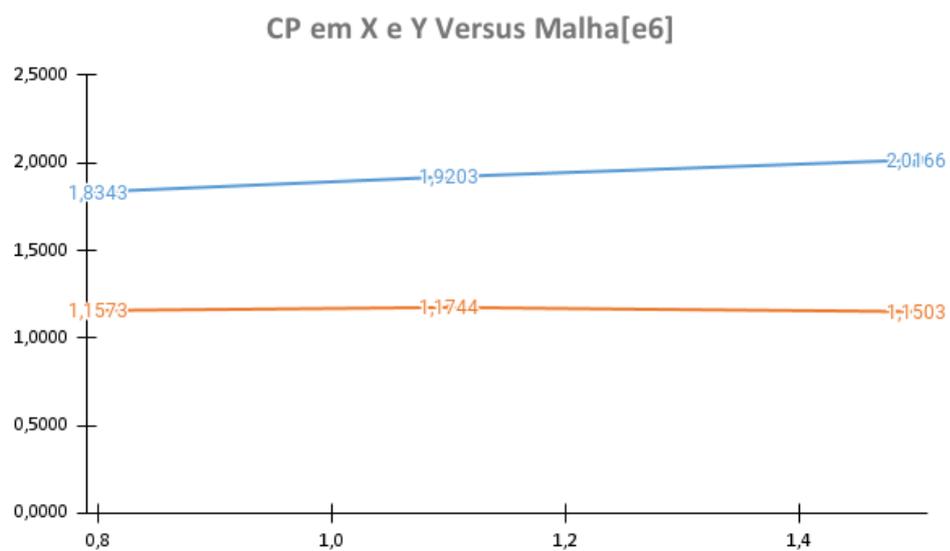
Figura 25 –  $C_L$  Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .



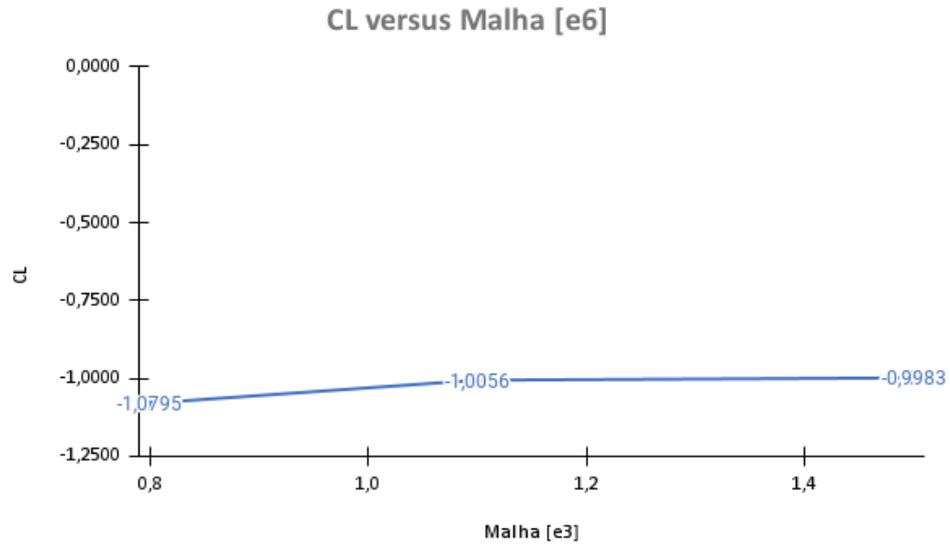
Fonte: Autor (2023)

Figura 26 –  $C_D$  Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .

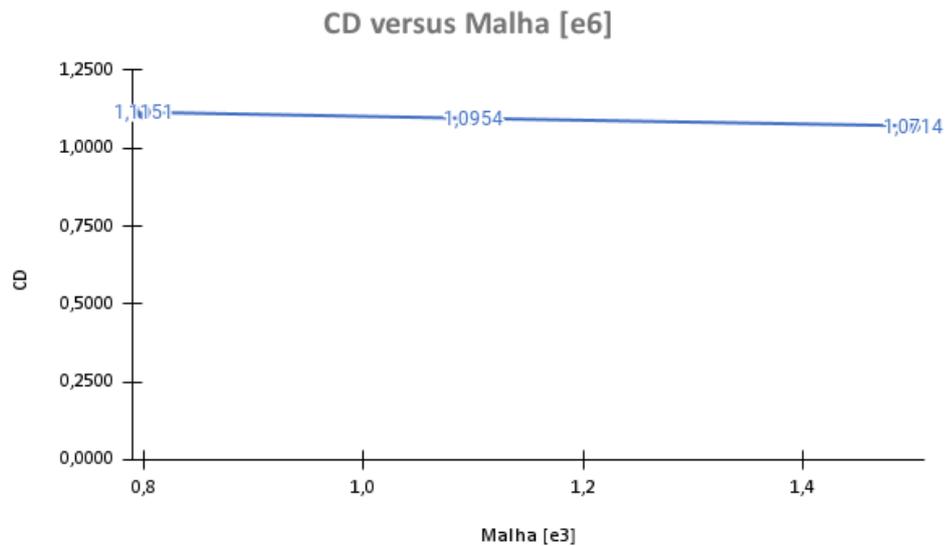
Fonte: Autor (2023)

Figura 27 –  $C_P$  Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds =  $1,7 \times 10^6$ .

Fonte: Autor (2023)

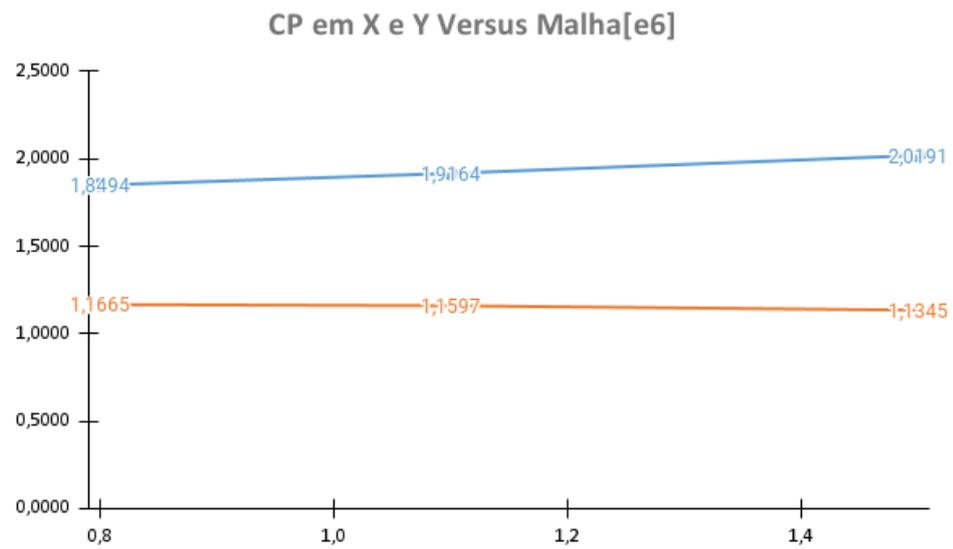
Figura 28 –  $C_L$  Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .

Fonte: Autor (2023)

Figura 29 –  $C_D$  Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .

Fonte: Autor (2023)

Figura 30 –  $C_P$  Geometria Combinada sem o DRS para Reynolds =  $3,4 \times 10^6$ .



Fonte: Autor (2023)

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram separados em três etapas, sendo a primeira etapa focada na análise dos efeitos da asa traseira no escoamento do veículo, a segunda etapa demonstrando esses efeitos na dinâmica veicular para frenagem e a terceira etapa para uma situação de escorregamento em curva, onde a segunda e terceira etapa visaram uma simulação da situação de acordo perfil dos veículos adotados no presente trabalho.

### 4.1 MALHA

De acordo com o estudo proposto por Mendis (2018), a malha Poly-Hexcore se destaca pela eficiência computacional, isso é, gerar a convergência com uma quantidade menor de elementos, foi demonstrado de fato que essa malha é uma excelente escolha para geometrias complexas sem necessitar de uma grande quantidade de elementos para a convergência onde abaixo a tabela faz uma comparação de acordo com o material de referência para o modelo proposto na metodologia do presente trabalho sobre os dados do  $C_L$  e  $C_D$  para a malha Tetraédrica e a Poly-Hexcore.

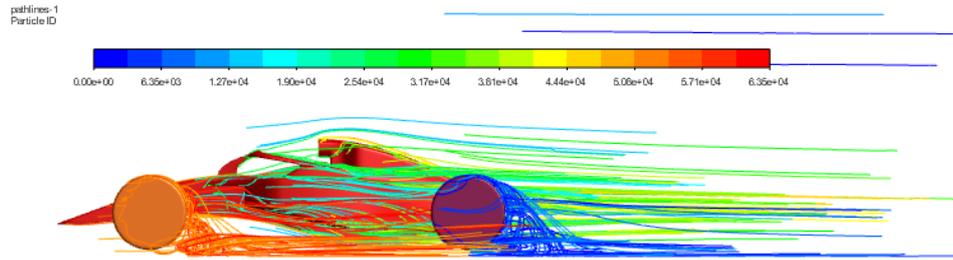
Tipo	1	2	3
Poly-Hexcore	$0,8 \times 10^6$	$1,1 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6$
Tetraédrica	$8 \times 10^6$	$10 \times 10^6$	$12 \times 10^6$
Diferença	1000%	909%	800%

Tabela 5 – Comparação de Elementos nos Tipos de Malha - Autor (2023)

### 4.2 COMPORTAMENTO ASA E CORPO

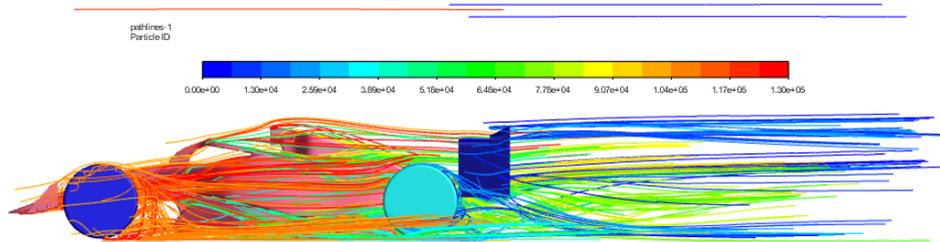
Visto que a essência do trabalho é verificar a influência da asa traseira na estabilidade dos veículos de F1 na frenagem, se tornou necessário uma análise inicial do comportamento das linhas de fluxo com e sem a asa traseira para averiguar de onde surgem as forças aerodinâmicas que vão influenciar nas reações dos penus, conforme a Figura 31, 32 e 33. Esse resultado mostra o comportamento de separação do fluxo esperado, onde segundo Katz (2006) com a asa essa nova interação de distribuição de pressão com o corpo vai aumentar os efeitos aerodinâmicos, onde o que mais se espera é aumentar os efeitos da downforce.

Figura 31 – Linhas de Fluxo do Modelo Referência.



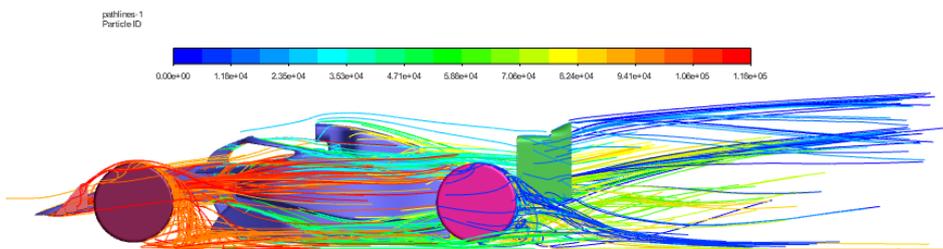
Fonte: Autor (2023)

Figura 32 – Linhas de Fluxo com DRS.



Fonte: Autor (2023)

Figura 33 – Linhas de Fluxo sem DRS.

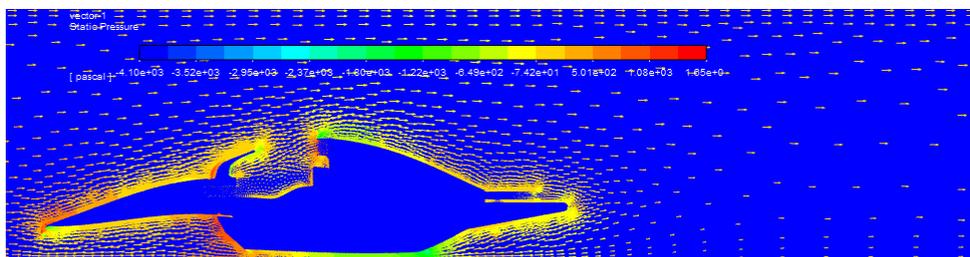


Fonte: Autor (2023)

#### 4.2.1 Distribuição de Pressão Estática Baixo Reynolds

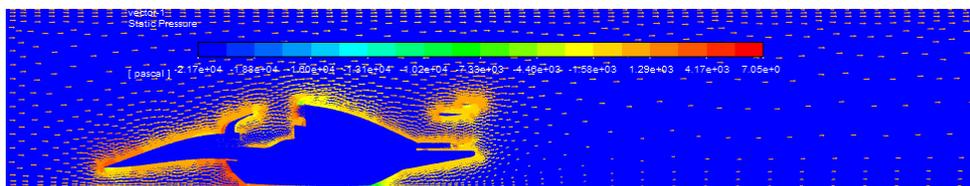
Então se tornou necessário a partir do resultado da linha de fluxo um detalhamento do comportamento da distribuição de pressão estática ao longo do domínio, Figura y. Na região da asa traseira se mostra o comportamento esperado dos aerofólios invertido, demonstrando claramente as regiões de maior e menor pressão, onde para a asa traseira com o DRS desativado existe uma maior diferença de pressão, onde esse fato segundo Raymer (2018) é devido ao caminho do fluido percorrendo o aerofólio, onde no caso do NACA2412 por ser simétrico, o seu arqueamento não deve induzir a elevados valores de sustentação negativa.

Figura 34 – Distribuição de Pressão na Asa com DRS.



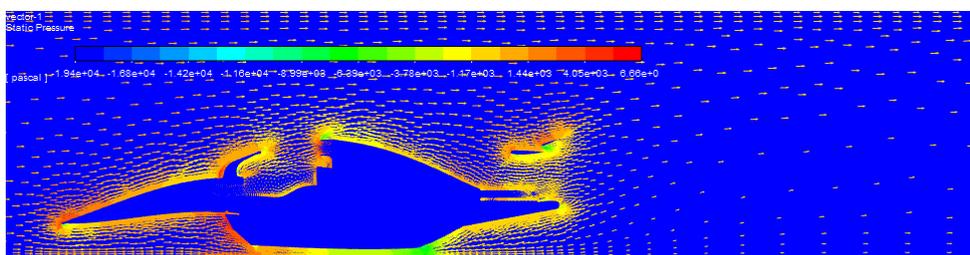
Fonte: Autor (2023)

Figura 35 – Distribuição de Pressão na Asa com DRS.



Fonte: Autor (2023)

Figura 36 – Distribuição de Pressão na Asa sem DRS.



Fonte: Autor (2023)

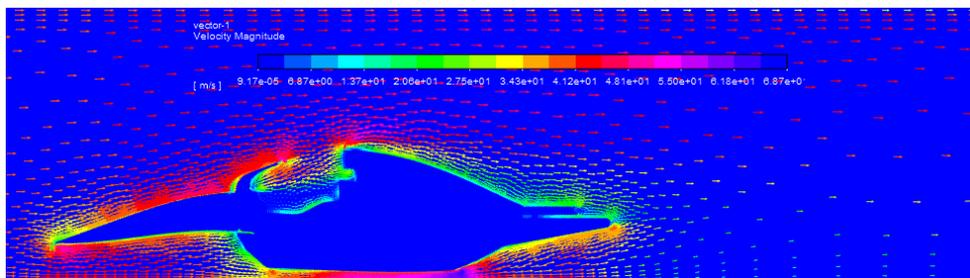
Por fim, vale ressaltar que fazendo uma comparação das Figuras 35 e 36 com as Figuras 32 e 33, se percebe uma diferença no fluxo de partículas saindo da região do difusor ocorrendo devido justamente ao aumento de pressão na região superior do escoamento, na Figura 31 o fluxo de partículas é bem reduzido, explicitando ainda

mais a influência da asa traseira na quantidade de partículas passando pela região. Na Figura 40 tem uma melhor demonstração referentes a região específica da asa traseira, sobre o gradiente de pressão e velocidade.

#### 4.2.2 Distribuição de Velocidade

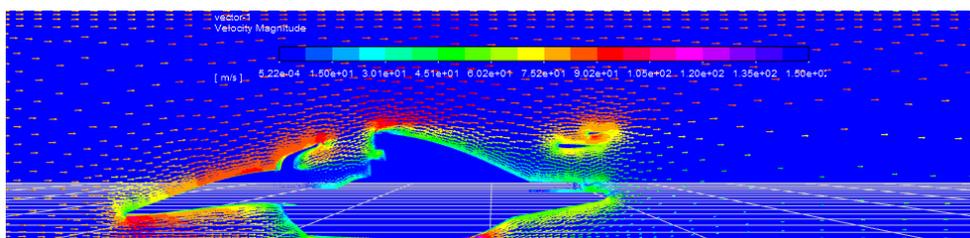
Por fim nessa análise do escoamento se tem os resultados referentes ao perfil da velocidade para averiguar o princípio de Bernoulli, onde conforme ocorre um aumento de pressão em uma linha de fluxo consequentemente deve ocorrer uma queda da velocidade em determinado ponto, assim como em outro ponto deverá ocorrer o inverso (RAYMER, 2018, p.391) para manter a conservação da massa do domínio, onde as figuras abaixo demonstram:

Figura 37 – Distribuição da Velocidade Modelo de Referência.



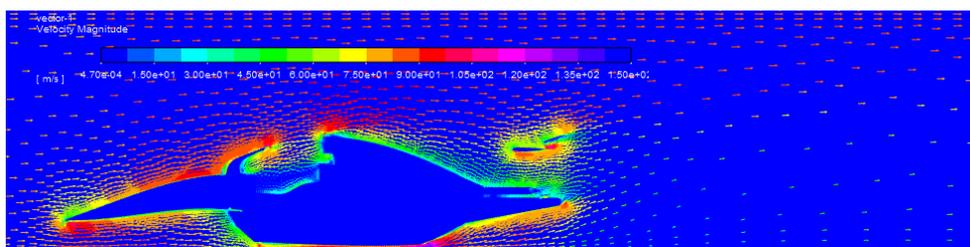
Fonte: Autor (2023)

Figura 38 – Distribuição da Velocidade com DRS.



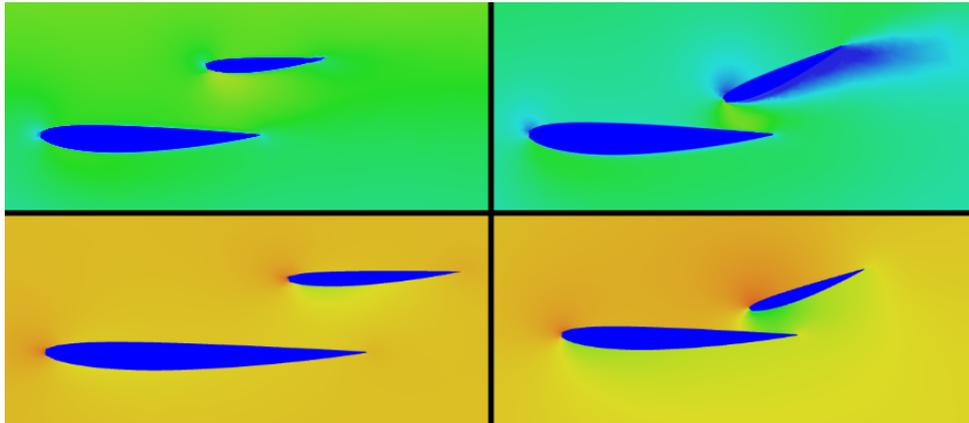
Fonte: Autor (2023)

Figura 39 – Distribuição da Velocidade sem DRS.



Fonte: Autor (2023)

Figura 40 – Destaque Gradiente da Velocidade e Pressão com e sem DRS.



Fonte: Autor (2023)

Com isso, tem-se que essa passagem do veículo com a asa gera uma diferente maneira do ar se mover sobre a superfície do veículo, gerando mais arrasto de péle e modificando a distribuição de velocidade dessas partículas no domínio modificando a distribuição de pressão, conforme Raymer (2018), e assim gerando a sustentação negativa.

#### 4.3 REAÇÕES NOS PNEUS E FRENAGEM

Visto que o presente trabalho tem como objetivo identificar as relações entre a asa e a estabilidade veicular durante as situações de frenagem e escorregamento, as Tabelas 6 e 7 transcrevem os resultados das análises para as forças aerodinâmicas e as Tabelas 8 e 9 para as reações nos pneus durante a frenagem e a força de frenagem necessária para o veículo sob determianda velocidade.

Tipo	L(kN)	D(kN)	$M_L$ (kN.m)
Modelo	-0,66	1,92	-0,54
DRS	-1,44	2,06	-0,09
n-DRS	-2,02	-,15	-0,49

Tabela 6 – Sustentação e Arrasto  $Re_L = 1,7 \times 10^6$  - Autor (2023)

Tipo	L (kN)	D(kN)	$M_L$ (kN.m)
Modelo	-2,55	7,64	-2,23
DRS	-5,38	8,46	-1,09
n-DRS	-7,98	8,57	-1,99

Tabela 7 – Sustentação e Arrasto  $Re_L = 3,4 \times 10^6$  - Autor (2023)

Para as Tabelas 6 a 40 m/s e 7 a 80 m/s, que demonstram duas situações de velocidade e sua influência nas cargas aerodinâmicas, ocorre o esperado justamente pela oscilação da pressão estática nas regiões citadas acima e assim as forças de sustentação negativa por conta da pressão nas asas e no corpo aumentarem como consequência. Outra situação interessante de analisar é a diferença de sustentação negativa em comparação com o arrasto de acordo com o ângulo de ataque, no caso quando o sistema de DRS está ativado e quando não está. Quando o DRS é ativado, equivalendo a um ângulo de  $0^\circ$ , temos uma diminuição da área molhada e pela simetria do arqueamento do aerofólio, temos um aumento relativo da sustentação e do arrasto. Quando o DRS é desativado, ocorre uma influência em um aumento do arrasto pela pressão de acordo com uma aceleração elevada no bordo de ataque, onde a camada limite é maior e depois a diminuição da mesma junto com uma desaceleração ao longo da geometria até o ponto de inversão do fluxo e assim gerando um leve aumento do arrasto pela pressão resultando na separação do mesmo assim como um aumento bem mais considerável das sustentação negativa por conta do aumento do ângulo de ataque. conforme demonstram os gráficos das Figuras 22 e 28.

Também ocorreram as situações esperadas de acordo com a situação de freio, onde a distribuição de carga de frenagem está 0,51 para o eixo dianteiro e 0,49 para o eixo traseiro, como também pela transferência de carga ocorrer da traseira pra dianteira durante a frenagem e assim sendo coerente para a estabilidade durante a frenagem de um veículo com freio nas quatro rodas, conforme citado no estudo de caso. As Tabelas 8 e 9. Entretanto vale ressaltar que para a situação onde o DRS está desativado, houve uma mudança brusca na posição do CP no eixo x e assim resultando em uma maior influência no momento de arfagem por conta da sustentação negativa, assim aumentando significativamente o momento de arfagem para a situação sem o DRS ativado.

Tipo	$R_f$ (kN)	$R_a$ (kN)	$F_f$ (kN)	$a(m/s^2)$
Modelo	4,10		4,37	11,89
DRS	4,78	4,49	7,88	12,92
n-DRS	5,58	4,26	8,37	13,66

Tabela 8 – Reações nos Pneus e Frenagem  $Re_L = 1,7 \times 10^6$  - Autor (2023)

Tipo	$R_f$ (kN)	$R_a$ (kN)	$F_f$ (kN)	$a(m/s^2)$
Modelo	4,21	6,17	8,82	21,42
DRS	6,86	6,34	11,23	25,49
n-DRS	10,04	5,78	13,44	28,44

Tabela 9 – Reações nos Pneus e Frenagem  $Re_L = 3,4 \times 10^6$  - Autor (2023)

A velocidade média na curva La Parabolica em Monza é de 55 m/s, onde no presente trabalho está se utilizando como base de cálculo 40 m/s e 80 m/s. De acordo com o modelo de velocidade máxima em curvas sem perder a estabilidade por conta do escorregamento proposto pelo Nicolazzi (2012), a velocidade máxima da La Parabolica é de 52 m/s. Sendo assim, visto que o presente trabalho não adotou os perfis de aerófolio que gerassem a maior sustentação negativa, assim como não houve um trabalho em cima da asa frontal e do difusor, os resultados são coerentes mostrando a situação onde há perda da estabilidade total do carro para 80 m/s e a perda parcial da estabilidade para 40 m/s, onde para a situação do modelo sem nenhuma influência da asa traseira é notável uma pior performance do veículo.

Tipo	e(%)
Modelo	47
DRS	43
n-DRS	40,5

Tabela 10 – Situação de Escorregamento em  $Re_L = 1,7 \times 10^6$  - Autor (2023)

Tipo	e(%)
Modelo	153,6
DRS	120,7
n-DRS	100,7

Tabela 11 – Situação de Escorregamento em  $Re_L = 1,7 \times 10^6$  - Autor (2023)

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho visou um estudo de caso da influência da asa traseira na frenagem e escorregamento de carros F1, assim convergindo os dois meios de estudo, aerodinâmica e dinâmica veicular. Foi notado e ilustrado os processos computacionais e físicos que acompanham esse estudo. O entendimento desses processos possibilitaram uma melhor compreensão de conceitos de volume de controle, conservação da massa e da quantidade de movimento, relações de velocidade e pressão em diferentes pontos do domínio e como isso afeta a linha de fluxo, a importância de um CAD bem trabalhado para geração de malha assim como a necessidade de novos meios de geração de malha para convergência desses dados em geometrias mais complexas, para assim gerar os melhores resultados em situações de alto impacto, como a frenagem e o escorregamento em carros com alta velocidade do presente trabalho.

Sendo assim, os resultados demonstram que a situação onde o DRS está desativado é a melhor para a frenagem e o escorregamento, demonstrando uma maior atuação das forças aerodinâmicas conforme o ângulo de ataque no DRS da asa traseira em relação ao modelo e a asa traseira com o DRS ativado. Para a situação do escorramento, vale um ressaltado sobre a importância do estudo do momento de guinada na determinada situação e assim podendo ter uma análise mais coerente da performance do carro na curva.

Por fim, o trabalho também identificou a importância da análise criteriosa do aerofólio para obtenção de uma melhor ou pior performance no projeto da asa, onde de acordo com Raymer (2018) essa geometria atualmente não é escolhida como um perfil já pronto e sim gerado um perfil de aerofólio de acordo com o projeto em questão, sendo assim abrindo a abordagem para futuros trabalhos em cima do mesmo tema, entretando com o aerofólio como estudo de caso.

## REFERÊNCIAS

ANAC. **Aerofólio**. 2011. Disponível em: [https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por\\_ing/tr428.htm](https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_ing/tr428.htm). Acesso em: 26 jun. 2022.

ANDERSON, J. **Fundamentals of Aerodynamics 5th**. College Park, MD 20742, Estados Unidos: McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, 2011.

FIA. **2022 FIA FORMULA ONE WORLD CHAMPIONSHIP**. 2022. Disponível em: <https://www.fia.com/events/fia-formula-one-world-championship/season-2022/2022-fia-formula-one-world-championship>. Acesso em: 21 jun. 2022.

FIA. **2022 Formula 1 Technical Regulations**. 2022. Disponível em: [https://www.fia.com/sites/default/files/2022\\_formula\\_1\\_technical\\_regulations\\_-\\_iss\\_3\\_-\\_2021-02-19.pdf](https://www.fia.com/sites/default/files/2022_formula_1_technical_regulations_-_iss_3_-_2021-02-19.pdf). Acesso em: 27 jul. 2022.

KATZ, J. **Aerodynamics of Race Cars**. San Diego, California 92182: Department of Aerospace Engineering, San Diego State University, 2006.

MENDIS, H. **Aerofólio**. 2018. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/better-meshing-using-ansys-fluent-hashan-mendis/>. Acesso em: 21 mai. 2023.

PROJETO MOTOR, P. **A história das incríveis curvas inclinadas de Monza**. 2021. Disponível em: <https://projetomotor.com.br/f1-historia-curvas-inclinadas-monza/>. Acesso em: 04 jun. 2022.

MOTORSPORT, U. **The first appearance of wings on Formula 1 cars**. 2018. Disponível em: <https://us.motorsport.com/f1/news/1968-first-wings-f1-1000902/1389076/>. Acesso em: 16 jul. 2022.

NICOLAZZI, L. **Uma introdução à modelagem quase-estática de automóveis**. Florianópolis: GRANTE Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, 2012.

PELLEGRINI, P. **Autodromo Nazionale di Monza si rinnova: arrivano Parabolica (1955) e Variante Ascari (1972)**. 2018. Disponível em: <https://www.circusf1.com/2018/08/autodromo-nazionale-di-monza-si-rinnova-arrivano-parabolica-1955-e-variante-ascari-1972.php>. Acesso em: 09 out. 2022.

RAYMER, D. **Aircraft Design: A Conceptual Approach 6ed**. Blacksburg, Virginia: AIAA, 2018.

RILEY, J. **Advanced Turbulence Modeling Techniques**. 2006. Disponível em: <https://courses.washington.edu/mengr544/handouts-10/Fluent-k-epsilon.pdf>. Acesso em: 02 jun. 2023.

WILCOX, D. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. **AIAA Journal**, v. 26, n. 11, p. 1299–1310, 1988.

ÇENGEL, Y. **Termodinâmica**. University of Nevada, Reno: AMGH Editora, 2013.