

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ -UFPR

RAVEL GLOVATISKI

**AVALIAÇÃO DE AEROFÓLIOS DE UM  
VEÍCULO DE COMPETIÇÃO ATRAVÉS DA  
DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

CURITIBA

2023

RAVEL GLOVATISKI

**AVALIAÇÃO DE AEROFÓLIOS DE UM  
VEÍCULO DE COMPETIÇÃO ATRAVÉS DA DINÂMICA  
DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Universidade Federal do Paraná - UFPR, Setor de Tecnologia, como requisito para a obtenção de grau de especialista em Engenharia Automotiva.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - UFPR  
ENGENHARIA AUTOMOTIVA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Orientador: STEPHAN HENNINGS OCH

CURITIBA

2023

**TERMO DE APROVAÇÃO**

**RAVEL GLOVATISKI**

**AVALIAÇÃO DE AEROFÓLIOS DE UM  
VEÍCULO DE COMPETIÇÃO ATRAVÉS DA DINÂMICA DOS FLUIDOS  
COMPUTACIONAL**

**Monografia aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Engenharia Automotiva no Curso de Pós Graduação de Engenharia Automotiva da Universidade Federal do Paraná - UFPR, pela seguinte banca examinadora:**

---

PROF. STEPHAN HENNINGS OCH

---

PROF. DR. LUIS HENRIQUE  
ASSUMPCÃO LOLIS

CURITIBA, 17 de agosto de 2023

*‘There is no other single aspect of competition car technology that has had such a big influence on performance as the exploitation of downforce’ “Simon McBeath”*

# Resumo

Os efeitos da aerodinâmica em veículos de competição são grande foco de estudo da área de engenharia envolvida nesse tipo de competição. É um estudo que demanda tempo, processamento e muito embasamento podendo gerar resultados tão grandes quanto o esforço necessário para fazê-lo, cada aleta, asa, perfil de aerofólio, design de carroceria, gera um efeito positivo ou negativo no rendimento do veículo, podendo ajudá-lo a fazer curvas ou freá-lo nas retas, por isso depende de análise e avaliação para otimizar formatos, perfis e áreas expostas ao escoamento dos fluidos por onde o veículo está passando. Neste trabalho é apresentado o estudo e comparação do uso de diferentes aerofólios em um veículo de competição da NASCAR Brasil. O estudo consiste em projetar e analisar perfis aerodinâmicos para a asa traseira e compará-los com o modelo utilizado na temporada 2023, com objetivo de entender seu funcionamento e avaliar possíveis mudanças e melhorias para o veículo e categoria. Para o projeto foi utilizado o *software* SolidWorks, partindo de um projeto 3D cedido pela NASCAR Brasil, a geometria inicial foi simplificada e reduzida à um perfil 2D, o mais simples possível sem comprometer os resultados das simulações. Para geração de malha foi utilizado o *software* Salome, onde foi feito um estudo de convergência de malha para determinar a versão ótima que viria a ser utilizada nas simulações. Para as simulações foi utilizado o *software* Open Foam, por se tratar de um *software* aberto para uso e que atendia os requisitos para este trabalho, dentre eles não ter custos agregados e poder simular tais perfis com baixo esforço computacional, visto que seria um empecilho se demandasse muito poder de processamento. Os Perfis atuais se mostraram condizentes e adequados ao uso e propósito geral da categoria, onde a zona de baixa pressão, o dito "vácuo" na linguagem coloquial de corridas, é extremamente benéfico e necessário à competição. Em termos de eficiência o melhor resultado trata-se do perfil originalmente utilizado, que melhor desempenhou em termos de *downforce* apesar de gerar o maior arrasto entre todas as opções simuladas. Os resultados obtidos foram até certo ponto como os esperados ao início do projeto, porém ao simplificar a geometria do veículo para a simulação, novas possibilidades foram encontradas para aumento de desempenho, como a adição de um assoalho traseiro no veículo.

**Palavras-chaves:** Aerodinâmica. Veículo de competição. Aerofólio. Dinâmica de fluidos computacional

# Abstract

The effects of aerodynamics in a race car are one of the greatest points of engineering study in many teams, factory's and development centers all over the world. It is a study that demands time,, theoretical basement and a lot of computer processing, all of this reflects on the final cost, as one of the expensive areas of development, can be as well The great vantage above other racing teams and vehicle factory's, could represent gains in performance and fuel efficiency for example, it could be the difference between a winner and a middle grid team in the greatest racing leagues all over the planet. In this paper its presented the study and comparison between different types of airfoils and it's effects in the aerodynamic forces in a NASCAR Brasil competition car. The study consists in project and analysis of different rear wing aerodynamic profiles and compare them to the model utilized in 2023 season, with the objective of understanding its flows and evaluate possible changes to improve the car and category. The software utilized to design and project the parts was the 2020 SolidWorks, starting off a complex 3D geometry that got simplified to be used in the software Salome 9.9.0 to generate a mesh and later be used in a 2D simulation on the 20.09 Open Foam, a open source software that ended up being the right choice principally being a free software and doesn't had the need of a great computational processing power for its use. The original model proved being the best option between the ones that were in this study, in spite having the great drag generation, it has the great down force generation as well. The obtained results were align with the initial thoughts about the project, and with the ideals and performance desires of the category, but with the simplification of the geometry, new possibilities of vehicle's performance improvements were verified.

**Key-words:** Aerodynamics, Competition car, Airfoil, Computational fluid dynamics

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Aerofólio . . . . .	15
Figura 2 – Distribuição de forças aerodinâmicas em perfil de aerofólio aplicado a um veículo de competição . . . . .	16
Figura 3 – Representação da camada limite . . . . .	17
Figura 4 – Representação variáveis Navier-Stokes . . . . .	20
Figura 5 – Perfil 3D . . . . .	22
Figura 6 – Modelo 3D . . . . .	22
Figura 7 – Perfil 2D . . . . .	22
Figura 8 – Modelo 2D . . . . .	22
Figura 9 – Detalhe asa original com 50° de inclinação . . . . .	23
Figura 10 – Detalhe asa original com 45° de inclinação . . . . .	23
Figura 11 – Detalhe sem asa . . . . .	24
Figura 12 – Detalhe asa experimental com abertura . . . . .	24
Figura 13 – Detalhe asa NACA 23012 . . . . .	25
Figura 14 – Medidas túnel de vento teórico . . . . .	25
Figura 15 – Malha inicial . . . . .	26
Figura 16 – Malha refinada . . . . .	27
Figura 17 – Resultados Pressão (p) . . . . .	29
Figura 18 – Resultados Magnitude (U) . . . . .	30
Figura 19 – Resultados Turbulência ( $\nu Tilda$ ) . . . . .	31
Figura 20 – Resultados U - <i>Streamline</i> . . . . .	32
Figura 21 – Resultados U - detalhe . . . . .	33

# Lista de abreviaturas e siglas

CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
NASCAR	<i>National Association for Stock Car Auto Racing</i>
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
OpenFOAM	<i>Open-source Field Operation And Manipulation</i>
FIA	Federação Internacional de Automobilismo



# Lista de símbolos

$A$	Área
$Cd$	Coefficiente de arrasto
$Cl$	Coefficiente de Sustentação
$Cm$	Coefficiente de momento
$D$	Força de arrasto
$V$	Velocidade
$L$	Força de sustentação
$\rho$	Massa específica do fluido

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo principal</b>	<b>11</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>15</b>
<b>3.1</b>	<b>Aerofólio</b>	<b>15</b>
3.1.1	Tipos de aerofólio	17
<b>3.2</b>	<b>Camada Limite</b>	<b>17</b>
<b>3.3</b>	<b>Arrasto e Sustentação</b>	<b>18</b>
3.3.1	Força de arrasto	18
3.3.2	Força de sustentação	18
<b>3.4</b>	<b>Forças aerodinâmicas em um veículo de competição</b>	<b>19</b>
3.4.1	Balanço Aerodinâmico	19
<b>3.5</b>	<b>Número de Reynolds</b>	<b>19</b>
<b>3.6</b>	<b><i>Computational Fluid Dynamics</i></b>	<b>19</b>
3.6.1	Equação de Navier-Stokes	19
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>21</b>
<b>4.1</b>	<b>Propósito do estudo</b>	<b>21</b>
<b>4.2</b>	<b>Modelagem</b>	<b>21</b>
4.2.1	Geração da malha	25
4.2.2	Simulação	27
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>29</b>
<b>5.1</b>	<b>Tratamento dos dados obtidos</b>	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Comparação dos resultados</b>	<b>34</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>36</b>
<b>6.1</b>	<b>Recomendações para trabalhos futuros</b>	<b>36</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>38</b>

# Introdução

## 1 Introdução

Ao longo da história dos veículos a motor, vários exemplares se destacaram individualmente pela forte influência aerodinâmica em seu design. Até recentemente as linhas de fluxo eram apenas itens estéticos com um mínimo propósito de economia de combustível, porém com a alta do preço dos combustíveis por volta de 1970 foi promovida uma grande mudança de direção no design automotivo, indo em direção à um design eficiente para economia de combustível, assim como a eficiência do motor, a massa do veículo e o arrasto aerodinâmico, como evidencia [David A. Crolla 2009]. Aerodinâmica é um grande e complexo assunto, um dos maiores objetivos desta área no esporte a motor é a geração de *downforce*, que pode melhorar desde frenagens até aumentar velocidades em curvas. Inclusive é objeto de estudo das mais modernas equipes de automobilismo ao redor do mundo, e geralmente é um fator decisivo em relação à quais equipes andam à frente em uma competição.

A interação entre os variados tipos de dispositivos aerodinâmicos são demasiado importantes para extrair o máximo de benefícios que o fluxo de ar ao redor do veículo pode oferecer, sendo o objetivo geral e principal maximizar o *downforce* sem gerar arrasto aerodinâmico, como mostra [Seward 2014]. Para extrair o desempenho de um conjunto de motor e transmissão ao máximo, a carroceria do veículo deve ter o formato mais aerodinâmico possível, mas ao mesmo tempo o *downforce* também deve ser contabilizado, desde que muitos acidentes acontecem em altas velocidades devido à perda de controle do veículo por parte do piloto. Enquanto a redução de arrasto é importante para a eficiência do veículo, o *downforce* é significativo quanto à estabilidade e dirigibilidade do mesmo, como mostra [Singh, Jain e Sharma 2020]

## 1.1 Objetivo principal

O objetivo principal deste trabalho é realizar o projeto e a simulação de perfis aerodinâmicos utilizando como base o veículo de competição da NASCAR Brasil da temporada de 2023, analisar e comparar os resultados a fim de sugerir melhorias para o carro e categoria.

## 1.2 Objetivos específicos

São objetivos deste trabalho:

1. Construir geometria em CAD de diferentes concepções de asas traseiras para o veículo de competição da NASCAR Brasil 2023, e gerar malha para simulação.
2. Simular através de CFD o escoamento do conjunto carro-asa traseira em forma de perfil para obter os coeficientes aerodinâmicos.
3. Comparar os resultados obtidos a fim de estabelecer qual a melhor opção para a categoria melhorar o desempenho dos veículos de competição.

## 2 Revisão bibliográfica

Ao realizar o projeto, simulação e avaliação de uma asa traseira, como a proposta deste trabalho, diversas dúvidas e questões recorrentes surgem durante o desenvolvimento, que podem ser respondida em trabalhos similares, por isso esta revisão bibliográfica é realizada.

[Kieffer, Moujaes e Armbya 2006] produziu um estudo a partir da asa dianteira de um carro de competição da Fórmula Mazda, tratou o problema como bidimensional, seu objetivo foi comparar asas dianteiras iguais em situações diferentes, principalmente para obter as principais características da geometria de aerofólio e os efeitos do ajuste de parâmetros importantes como o ângulo de ataque e o efeito solo na parte da frente. Também ressalta que como Ira H. Abbott, et al explica em *Theory of Wing Sections*, existem limitações em aplicar resultados obtidos a partir de túneis de vento bidimensionais em asas tridimensionais com tamanho finito, porém como trata-se de uma comparação entre o mesmo veículo e aplicações similares pode ser estudado desta forma. E também explica que os perfis destas asas são invertidos para criar *downforce* ao invés de sustentação como em asas aplicadas a aeronaves.

[Katz e Dykstra 1994] Conta em seu artigo sobre a aplicação de métodos computacionais no desenvolvimento de veículos protótipos para competição que o formato da carroceria é comumente limitada por regulamentos específicos de cada categoria, por outros parâmetros e posicionamentos de peças e componentes do veículo. Conta ainda que estes aspectos interferem diretamente no projeto das asas e demais componentes aerodinâmicos, e devido à estas interferências e ao uso de maneira invertida dos perfis aerodinâmicos em relação à indústria aeronáutica, os métodos computacionais são frequentemente utilizados para redesenhar e alterar os perfis pré estabelecidos e desenvolver novos modelos para obtenção de melhores resultados

[Katz 2006] Ainda cita em outro trabalho, *Aerodynamic of racing cars*, que as interações aerodinâmicas entre dois ou mais carros podem alterar a estabilidade do veículo e afetar diretamente aspectos de dirigibilidade e conseqüentemente de segurança. E reforça que o desenvolvimento da parte aerodinâmica não se dá apenas no momento de projeto inicial, mas depois do veículo pronto continuando com a análise computacional e inclusive sendo possível sensorizar o carro e fazer testes práticos específicos para continuar melhorando o veículo.

[Fu, Uddin e Robinson 2018] Apontam que simulações por meio de CFD e túneis de vento são dois métodos comumente usados por equipes de corrida para testar o desempenho aerodinâmico de seus carros, apontam ainda que os dois métodos simulam de forma muito

próxima um carro correndo em uma pista, e que apesar de o túnel de vento utilizar o modelo físico real, o CFD pode fornecer um melhor entendimento quanto ao escoamento interagindo com o veículo e geralmente funciona como uma boa ferramenta de redução de custos no desenvolvimento e estudo dos veículos. Parte do conceito de um escoamento turbulento, incompressível, em regime permanente, juntamente à um Reynolds mediano, utilizando equações de Navier-Stokes para suas análises. Também utiliza como modelo de estudo um NASCAR Gen 6 Cup, com uma leve simplificação para simulação em CFD, onde somente os componentes que não entram em contato com o fluxo de ar do lado externo foram simplificados, e afim de obter resultados similares aos obtidos em túneis de vento, foi considerado um sistema de malha fechada para a simulação

[Singh, Jain e Sharma 2020] fala em seu trabalho sobre a importância do *downforce* e sobre como a sustentação e o arrasto são itens indesejados em um veículo de competição. *Downforce* aumenta a aderência e melhora os contornos de curva do veículo, porém, os mesmos dispositivos e componentes que produzem *downforce* também geram arrasto, como resultado das simulações em CFD, obtém-se os coeficientes de arrasto e sustentação, este por sua vez, negativo, demonstrando *downforce*, e não sustentação, para tal, foi feito o processo de simulação, criando malha e definindo as condições de contorno, considerando o veículo à uma velocidade de 75 m/s ou 275,5 km/h. O modelo simulado foi simplificado, desconsiderando por exemplo a turbulência causada pelas rodas do veículo. [Naidu et al. 2023] em um trabalho similar, faz a análise das características aerodinâmicas de um difusor de ar em carros tipo sedã utilizando CFD, mostra que a aerodinâmica em geral tem grande impacto no desempenho, dirigibilidade, segurança e conforto do veículo, e que variações nestas características, como os coeficientes de sustentação e arrasto têm um notável impacto no desempenho do veículo. Também tem como foco do estudo, a análise da influência do uso de um difusor de ar no coeficiente de arrasto por meio de simulação utilizando o *software* Ansys, variando os ângulos de posicionamento, chegando à uma força de arrasto mínima de 119,019 N com o difusor em 12° de inclinação. Em seu artigo [Granados-Ortiz, Morales-Higueras e Ortega-Casanova 2023] tratam da simulação 3D em CFD da interação entre a roda da frente, os dutos de freio e a asa dianteira de um veículo de competição da categoria Fórmula 1. Comparou dois modelos diferentes, ambos em concordância com o regulamento da FIA, que implicam em utilizar uma asa dianteira composta de cinco elementos, com efeito solo e mais de 30 parâmetros e restrições de *design* e geometria. Também com base nas equações de Navier-Stokes, a simulação foi feita em Ansys no formato 3D e analisada em 2D. Para a simulação, foi feito um estudo de convergência de malha, e validação da mesma. Como resultado verificaram melhor eficiência em um dos modelos, porém todos os dois simulados mostraram-se eficientes a ponto de gerar mais *downforce* do que arrasto, gerando um aumento de 157,63 kg para 162,67 kg de *downforce* e um aumento de apenas 2,66 kg de arrasto. Ambos os modelos também se mostraram eficientes na geração de vórtices Y250 na direção dos dutos de freio,

necessários para maior eficiência na refrigeração dos discos de freio do veículo.

## 3 Fundamentação teórica

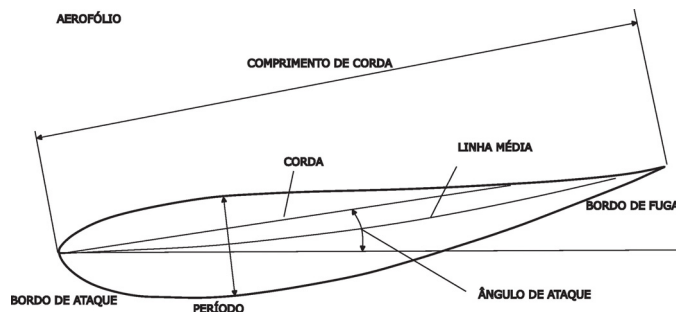
Neste capítulo serão apresentadas as equações que regem este estudo, assim como os conceitos básicos utilizados para concepção e modelagem dos perfis a serem estudados

### 3.1 Aerofólio

Aerofólio por definição é o perfil utilizado na peça, seja ela uma asa de uma aeronave, asa dianteira ou traseira de um veículo de competição no caso dos fórmulas, e apenas a asa traseira em veículos de competição ou de passeio, geralmente modelos esportivos, que utilizam estes apêndices aerodinâmicos, ou qualquer outra aplicação que envolva este tipo de perfil. Tiveram sua origem na indústria aeronáutica onde o objetivo era criar sustentação, no *motorsport* são utilizadas de maneira invertida à sua aplicação original, para criar *downforce*.

O aerofólio é composto pelas seguintes partes:

Figura 1 – Aerofólio



Fonte: Adaptado de [Seward 2014]

Corda, é uma linha reta que junta a frente do bordo de ataque à parte de trás do bordo de fuga.

A inclinação da linha da corda é relativa ao escoamento, e é conhecida como ângulo de ataque.

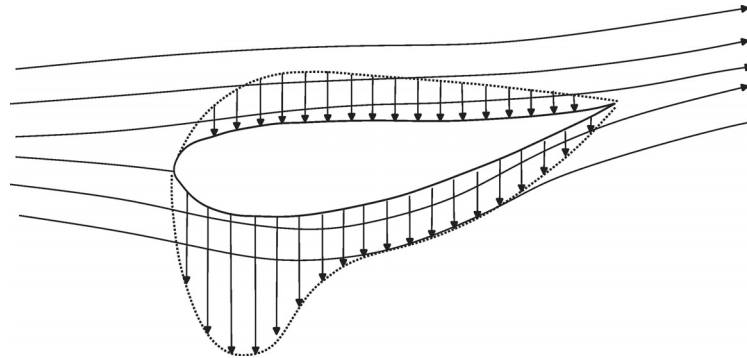
A linha média passa pelo centro da asa e mostra a curvatura da seção transversal do aerofólio, a máxima distância da linha média até a corda também pode ser expressado com uma porcentagem do comprimento da corda.

A espessura do aerofólio se dá pela medida entre os pontos mais distantes no meio do aerofólio.



Por causa da viscosidade resultante da camada limite, o fluxo de ar acopla ao lado de baixo e de cima do aerofólio.

Figura 2 – Distribuição de forças aerodinâmicas em perfil de aerofólio aplicado a um veículo de competição



Fonte: Adaptado de [Seward 2014]

Pode-se ver que comparado à pressão atmosférica, tem-se pressão positiva no topo da superfície e pressão negativa na parte inferior. As duas pressões contribuem para o *downforce*, porém a que mais contribui para tal é a pressão negativa da parte inferior.

A velocidade do escoamento diminui na parte superior e aumenta na inferior, causando um diferencial de pressão que culmina nas forças atuantes na asa, gerando *downforce*.

A maior pressão na parte inferior, ocorre no ponto de maior curvatura, e por isso muda a direção do escoamento. Mesmo no ângulo de ataque  $0^\circ$ , o aerofólio pode gerar *downforce*, entretanto também ocorre arrasto, e ambos aumentam à medida que se aumenta o ângulo de ataque, porém somente até certo ponto. Quando o ângulo de ataque alcança um valor crítico, o escoamento descola da asa, ou seja causa o descolamento da camada limite.

Asas de elemento único atingem pico de *downforce* em um ângulo de ataque de aproximadamente  $12^\circ$ .

Em asas de múltiplos elementos, compostas por um plano principal e uma ou mais abas, permite-se ao fluxo de pressão positiva do topo da asa, acelerar por entre a lacuna e re-energizar a pressão negativa na parte inferior do plano principal seguindo para a parte inferior da aba.

A disposição permite combinar ângulos de até  $20^\circ$  antes de ocorrer o descolamento da camada limite, resultando em ganhos significativos de *downforce*.

### 3.1.1 Tipos de aerofólio

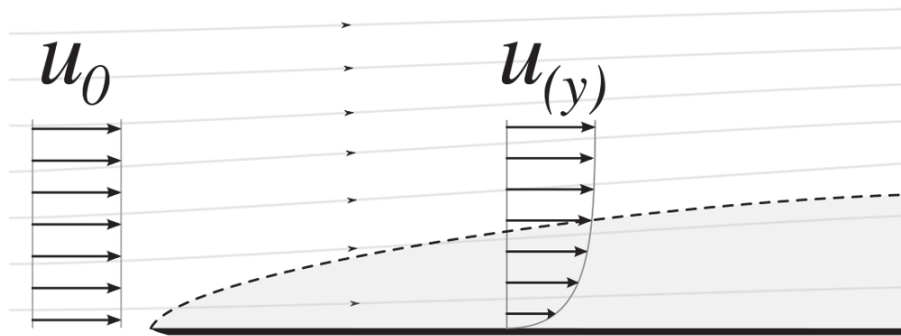
Como já mencionado anteriormente, existem vários tipos de apêndices aerodinâmicos em um veículo de competição, dentre estes, as asas, tanto dianteira como traseira são os que mais utilizam de perfis aerodinâmicos. Segundo [PHILIP J. PRITCHARD e JOHN C. LEYLEGIAN 2011] durante a década de 1930 o interesse neste tipo de perfil principalmente pela indústria aeronáutica da época aumentou consideravelmente, desde então, vários perfis foram definidos pela NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) que desenvolveu vários perfis de escoamento laminar conhecidos pela nomenclatura NACA e uma referência ao percentual do tamanho da corda, como por exemplo o NACA 60.

## 3.2 Camada Limite

Como [Seward 2014] apresenta em *Race Car Design*, 2014 quando um fluido vai contra um limite sólido, como a carroceria de um veículo por exemplo, a velocidade do fluido na interface com o sólido é zero, mesmo nas mais polidas superfícies.

Devido à viscosidade, o fluido próximo a camada limite é desacelerado, mas aumenta gradualmente para a velocidade livre de escoamento a medida que se distancia da camada limite.

Figura 3 – Representação da camada limite



Fonte: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Camada\\_limite](https://pt.wikipedia.org/wiki/Camada_limite)

A espessura da camada limite é normalmente definida como a distância da superfície até o ponto em que a velocidade chega a 99% da velocidade livre de escoamento, dependendo da rugosidade e do grau da turbulência no escoamento principal, mas geralmente ocorre antes do Reynolds chegar a  $2 \times 10^6$

Quando a linha de corrente encontra a superfície sólida, o escoamento na camada limite é laminar, mas como gradualmente perde energia, existe uma transição para uma camada turbulenta mais espessa sobre uma camada viscosa.

A presença da camada limite por si só causa arrasto na superfície do sólido.

### 3.3 Arrasto e Sustentação

As forças aerodinâmicas presentes em um carro de competição podem ser divididas principalmente em: força de arrasto e força de sustentação (*Downforce*.)

#### 3.3.1 Força de arrasto

De acordo com [Seward 2014] O arrasto aerodinâmico é a força que age na direção oposta ao movimento do veículo, consome energia do motor, impede a aceleração e reduz a velocidade máxima de um veículo. A força de arrasto total é dada pela equação:

$$F_a = C_d \times \frac{\rho v^2 A}{2} \quad (3.1)$$

Onde:  $F_a$  = Força de arrasto total (N),  $C_d$  = Coeficiente de atrito  $\rho$  = massa específica do fluido ( $kg/m^3$ ),  $A$  = Área frontal do veículo ( $v^2$ ) e  $v$  = Velocidade do fluido (m/s)

#### 3.3.2 Força de sustentação

A força de sustentação aerodinâmica é a força resultante da aceleração do fluido ao passar pelo perfil aerodinâmico, no caso dos aviões, esta força tem um coeficiente positivo que sustenta o avião no ar, no caso dos carros de corrida ocorre o inverso, como os perfis são utilizados de maneira invertida, o coeficiente torna-se negativo gerando *downforce*, empurrando o carro em direção ao chão.

[Seward 2014] informa que simples uso de um material qualquer inclinado cria *downforce* pela deflexão do ar e mudança do momento, porém é muito ineficiente se comparado à um aerofólio.

A força de sustentação total é dada pela equação:

$$F_s = C_l \times \frac{\rho v^2 A}{2} \quad (3.2)$$

Onde:  $F_s$  = Força de sustentação total (N),  $C_l$  = Coeficiente de sustentação  $\rho$  = massa específica do fluido ( $kg/m^3$ ),  $A$  = Área frontal do veículo ( $v^2$ ) e  $v$  = Velocidade do fluido (m/s)

## 3.4 Forças aerodinâmicas em um veículo de competição

Segundo [Seward 2014] as forças dinâmicas atuantes em um veículo de competição aumentam em função quadrática referente ao aumento de velocidade do mesmo, devido a isto é importante que a distribuição destas forças ao longo do veículo estejam balanceadas para que o sob e sobre esterçamentos sejam aceitáveis em diferentes velocidades, tornando o carro seguro e com boa dirigibilidade.

### 3.4.1 Balanço Aerodinâmico

É a principal resultante aerodinâmica, a soma de todas as forças aerodinâmicas. O objetivo é obter um balanço aonde o carro mantenha-se estável e dirigível em termos de sob e sobre esterçamento em todas as velocidades.

## 3.5 Número de Reynolds

Número adimensional é utilizado em mecânica dos fluidos para cálculo do regime de escoamento de um fluido sobre uma superfície. Ainda segundo [Seward 2014] se o estudo for realizado em escala em um túnel de vento, o número de Reynolds deve ser o mesmo que da escala real, por isso a velocidade do fluido deve aumentar proporcionalmente a diminuição da peça ou elemento testado em um túnel de vento em escala, por tal, o CFD se faz necessário, devido ao alto custo de se manter e utilizar um túnel de vento em escala 1:1 e pela dificuldade em conseguir com que os fluidos atinjam velocidades mais altas em túneis de vento em escala para manter o número de Reynolds igual ao modelo em escala real.

Para calcular o Reynolds utiliza-se a seguinte equação:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3.3)$$

Onde:  $Re$  = Reynolds,  $\rho$  = Densidade específica do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\mu$  = Viscosidade do fluido e  $V$  = Velocidade do fluido ( $\text{m}/\text{s}$ )

## 3.6 *Computational Fluid Dynamics*

### 3.6.1 Equação de Navier-Stokes

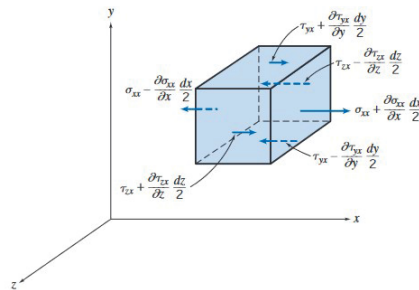
As equações que regem a simulação em CFD são as equações de Navier-Stokes, uma simplificação destas equações é feita para melhorar a eficiência em simulações computacionais de fluidos, em que é assumido um valor mediano a Reynolds, em escoamentos

incompressíveis de viscosidade constante utiliza-se as seguintes equações:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial [\rho u_i u_j]}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{\rho u_i u_j}) \quad (3.5)$$

Figura 4 – Representação variáveis Navier-Stokes



Fonte: [PHILIP J. PRITCHARD e JOHN C. LEYLEGIAN 2011]

## 4 Metodologia

Neste capítulo será apresentada a metodologia de trabalho desenvolvida, desde a escolha dos modelos até a geração de malha, simulação e análise dos resultados.

### 4.1 Propósito do estudo

O principal propósito do estudo é entender o escoamento ao redor do veículo da NASCAR Brasil, para verificar possíveis melhorias no futuro e entender o comportamento atual dos carros em pista.

Qualquer tipo de simulação CFD demanda muito processamento computacional, fator determinante para a escolha da metodologia do trabalho. Foi escolhido também uma geometria 2D do perfil aerodinâmico do veículo.

Os resultados esperados são a visualização do escoamento, cálculo de *downforce* do conjunto carro e aerofólio, e análise comparativa.

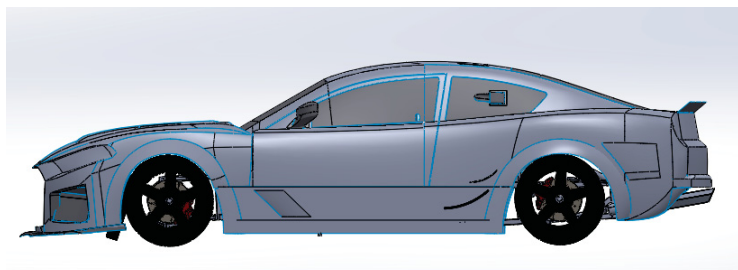
Levando em consideração os aspectos acima citados, a escolha dos *softwares* em sua sequência de utilização foi:

- SolidWorks 2020 para modelagem do túnel de vento e perfis aerodinâmicos;
- Salome 9.9.0 para confecção da malha;
- Open Foam 20.09 para a simulação.

### 4.2 Modelagem

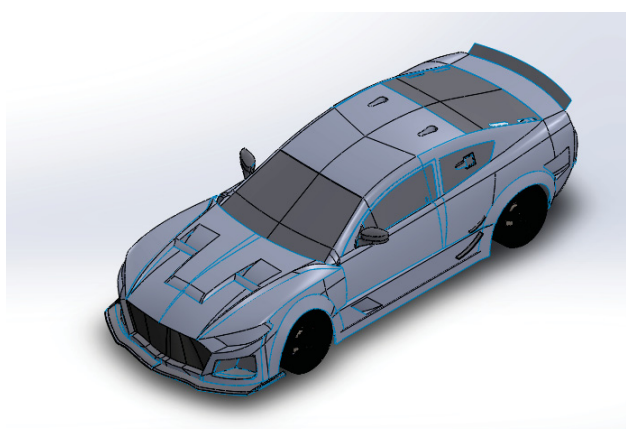
A partir de uma modelagem 3D já existente do carro da temporada 2023 da NASCAR Brasil, foi extraído o perfil 2D e as devidas alterações foram feitas para simplificação da geometria, visando reduzir o esforço computacional necessário para realizar as simulações.

Figura 5 – Perfil 3D



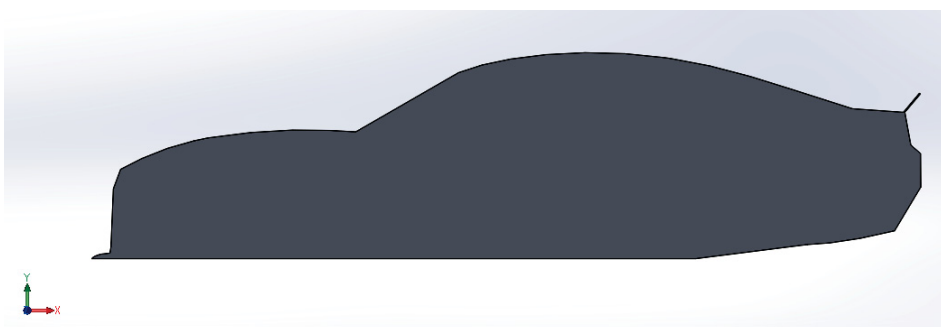
Fonte: Acervo NASCAR BR,2023

Figura 6 – Modelo 3D



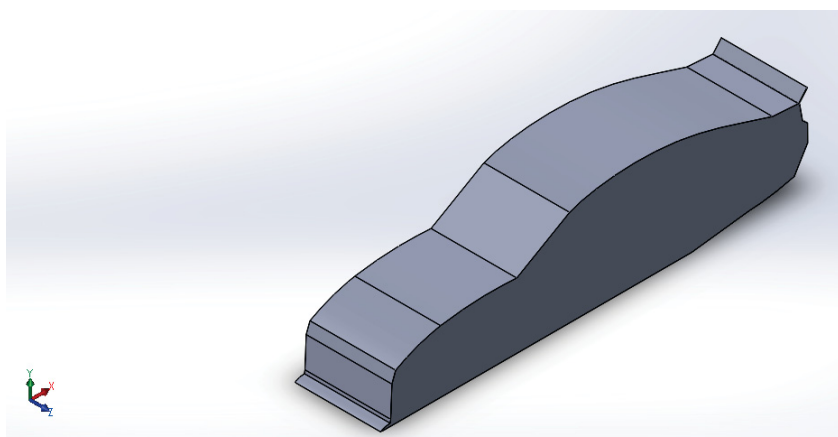
Fonte: Acervo NASCAR BR,2023

Figura 7 – Perfil 2D



Fonte: O Autor,2023

Figura 8 – Modelo 2D

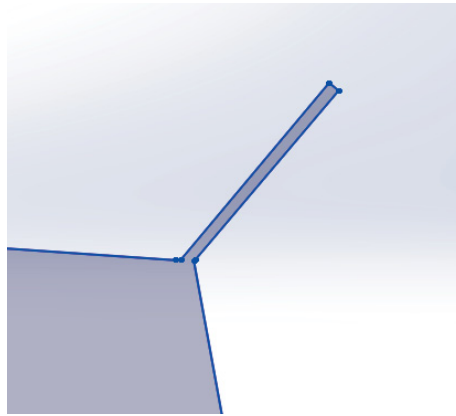


As alterações consistiram em fechar qualquer possível entrada de ar e confirmação de medidas.

Para tais simulações foram escolhidos 5 concepções diferentes:

1. Modelo original com  $50^\circ$  de inclinação, escolhido para ser o primeiro a ser simulado por ser o de uso mais comum da categoria, sendo um bom referencial, para entender o escoamento atual em torno do veículo

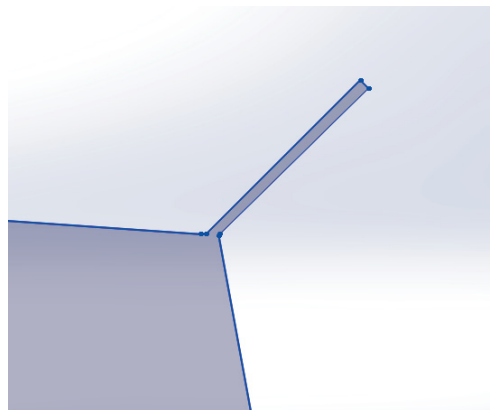
Figura 9 – Detalhe asa original com  $50^\circ$  de inclinação



Fonte: O Autor,2023

2. Modelo original com  $45^\circ$  de inclinação escolhido para ser o segundo ajuste de angulação da categoria, para entender o escoamento atual em torno do veículo quando utilizado nesta configuração.

Figura 10 – Detalhe asa original com  $45^\circ$  de inclinação

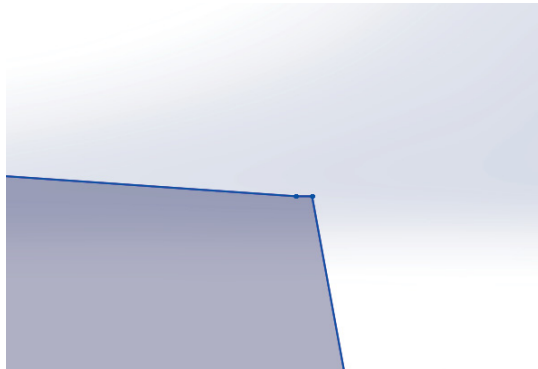


Fonte: O Autor,2023

3. Modelo sem asa para comparação de como o escoamento se comportaria em torno do veículo sem a interferência de qualquer tipo de asa.



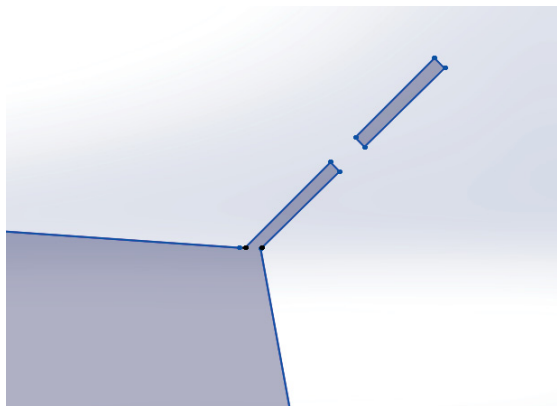
Figura 11 – Detalhe sem asa



Fonte: O Autor,2023

4. Modelo experimental com uma abertura no meio do perfil da asa, para entender se uma abertura no meio do perfil poderia causar menos arrasto e continuar com o mesmo nível de geração de *downforce* comparado aos perfis originais.

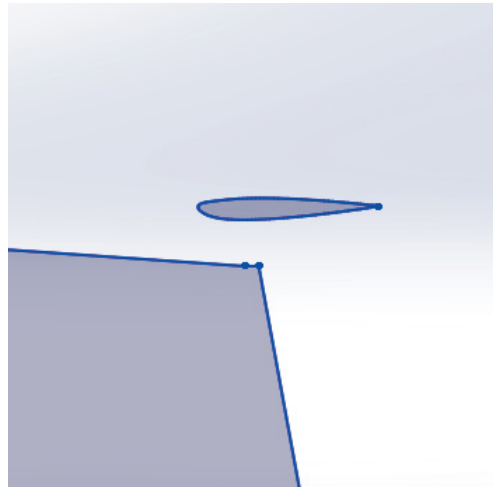
Figura 12 – Detalhe asa experimental com abertura



Fonte: O Autor,2023

5. Modelo NACA 23012, escolhido como alternativa ao modelo original, para verificação de eficiência e diminuição de arrasto com maior geração de *downforce* a partir deste perfil aerodinâmico adaptado.

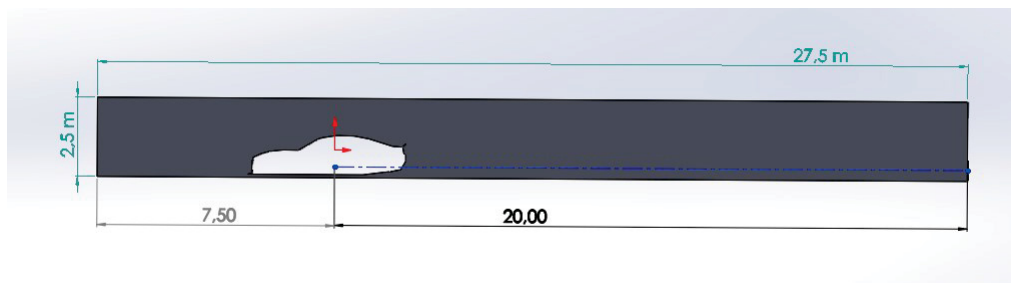
Figura 13 – Detalhe asa NACA 23012



Fonte: O Autor,2023

A partir destes arquivos, ainda no SolidWorks 2020 foi gerado um túnel de vento experimental, a partir da extrusão de um retângulo ao redor do perfil do veículo conforme imagem a seguir:

Figura 14 – Medidas túnel de vento teórico



Fonte: O Autor,2023

As medidas escolhidas para a formação deste túnel de vento experimental foram 7,5 m à esquerda da origem, para ter pelo menos o espaço de um veículo (5m) a frente, 20 m à direita da origem, e 2,5 m de altura.

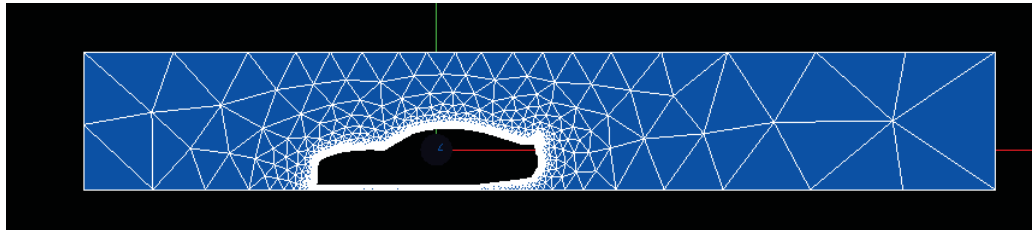
Os arquivos foram exportados no formato IGES (.igs) para utilização no *software* Salome 9.9.0.

#### 4.2.1 Geração da malha

A malha é composta por elementos geométricos, geralmente triangulares como a utilizada neste trabalho. O número de elementos está diretamente ligado ao refinamento da malha, quanto mais triângulos, mais refinada a malha se torna, porém a partir de certo ponto este refino acaba não valendo todo o esforço computacional e tempo de simulação

extras, pois a alteração é pouca ou nenhuma no resultado final, assim a malha converge para um resultado esperado. Tomando como base o padrão inicial do *software* a primeira malha feita no modelo atual do conjunto aerodinâmico mostrou resultados muito vagos.

Figura 15 – Malha inicial



Fonte: O Autor,2023

Esta figura mostra a malha inicial do projeto.

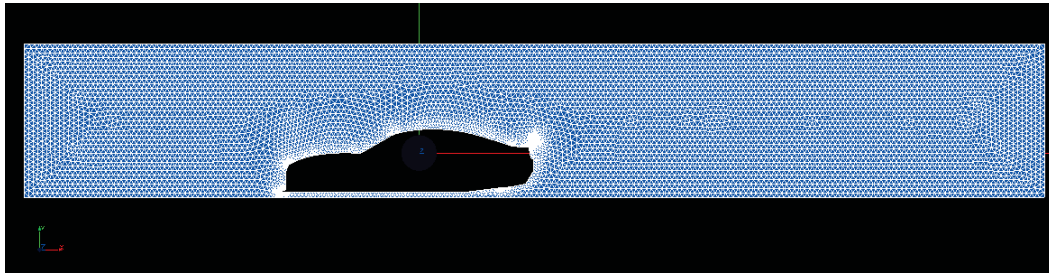
A malha foi refinada até demonstrar um erro relativo de aproximadamente 13%, para chegar até este número, várias concepções diferentes foram utilizadas na hora de gerar as malhas, assim como a variação do número de iterações, indo de 500 a 50 mil iterações, porém a malha que foi mais eficiente mostrou bons resultados com apenas 2 mil iterações, e assim foi determinada como a melhor alternativa para ser replicada nos outros modelos, como evidencia o estudo de malha e a malha refinada a seguir:

Tabela 1 – Estudo de malha

Estudo de malha			
Nº de elementos	Tempo de simulação (s)	Cl	Erro relativo ao Cl(%)
16478	105	-0,0698105	123
43492	151	-0,0312637	18
45430	153	-0,0383163	13
78988	250	-0,0441077	78
230446	168	-0,204202	387
43492	1194	-0,0419144	12
43492	30507	-0,037316	-

Fonte: O autor,2023

Figura 16 – Malha refinada



Fonte: O Autor,2023

Esta figura mostra a malha após todo o estudo e refino feito no trabalho.

Os parâmetros utilizados são:

Tabela 2 – Parâmetros de malha

Parâmetros de malha	
Parâmetros	Valores/Opções
Max. size	0.1
Min. size	0.01
Fineness	Fine
Local size	Carro 0.05
Element size weight	0.2
Nº surface optimization steps	3

Fonte: O autor,2023

#### 4.2.2 Simulação

Para a simulação, foi tomado como base o tutorial airFoil2D padrão do Open Foam 20.09, com as devidas alterações em relação ao tamanho do objeto de estudo. Para iniciar uma simulação no Open Foam 20.09, é preciso setar alguns parâmetros de condições de contorno nos arquivos raízes dentro de cada pasta da simulação, arquivos nomeados como p (conservação de massa), U (quantidade de movimento) e nuTilda (modelo de turbulência).

Arquivo U

- Velocidade em x,y e z - Como este projeto é simulado em 2D, apenas a velocidade em x foi aplicada, 45 m/s (160 km/h) que é a velocidade média de um veículo de competição desta categoria em uma volta rápida em um circuito fechado.

Arquivo p e nuTilda

Condições de regime permanente e escoamento laminar específicos a cada contorno

Outras condições:

- No arquivo forceCoeffs, é definida a densidade específica do fluido a ser estudado;
- Direção dos coeficientes de arrasto e sustentação;
- Magnitude da velocidade do veículo 45 (m/s);
- Comprimento da peça a ser estudada 4,98 m;
- Área frontal da peça a ser estudada  $1,24 \text{ m}^2$ .

Arquivo controlDict

Neste arquivo são setados os parâmetros de simulação, tais como tempo de simulação e a quantidade de iterações que a simulação irá calcular. Também pode se configurar o intervalo de registro dos cálculos, como e quando será gerado o resultado.

Critério de convergência utilizados:

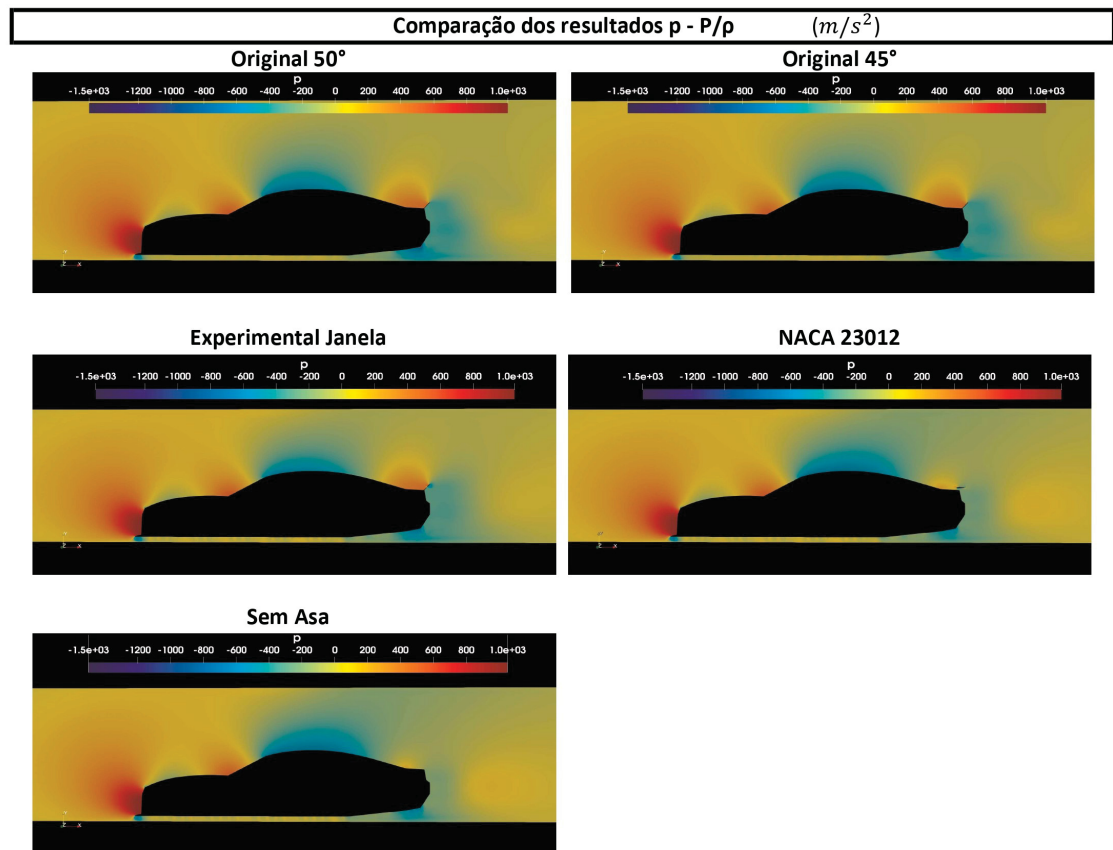
- p: tolerância  $1 \times 10^{-5}$ ;
- u: tolerância  $1 \times 10^{-5}$ ;
- nuTilda: tolerância  $1 \times 10^{-5}$ .

Modelo de turbulência SpallartAlmaras, equação que resolve um modelo de transporte para escoamento turbulento.

## 5 Resultados

Resultados obtidos a partir das simulações estão divididos em : Pressão (p), Magnitude (U), Turbulência ( $\nu$ Tilda) , U - *streamline* e U - detalhe

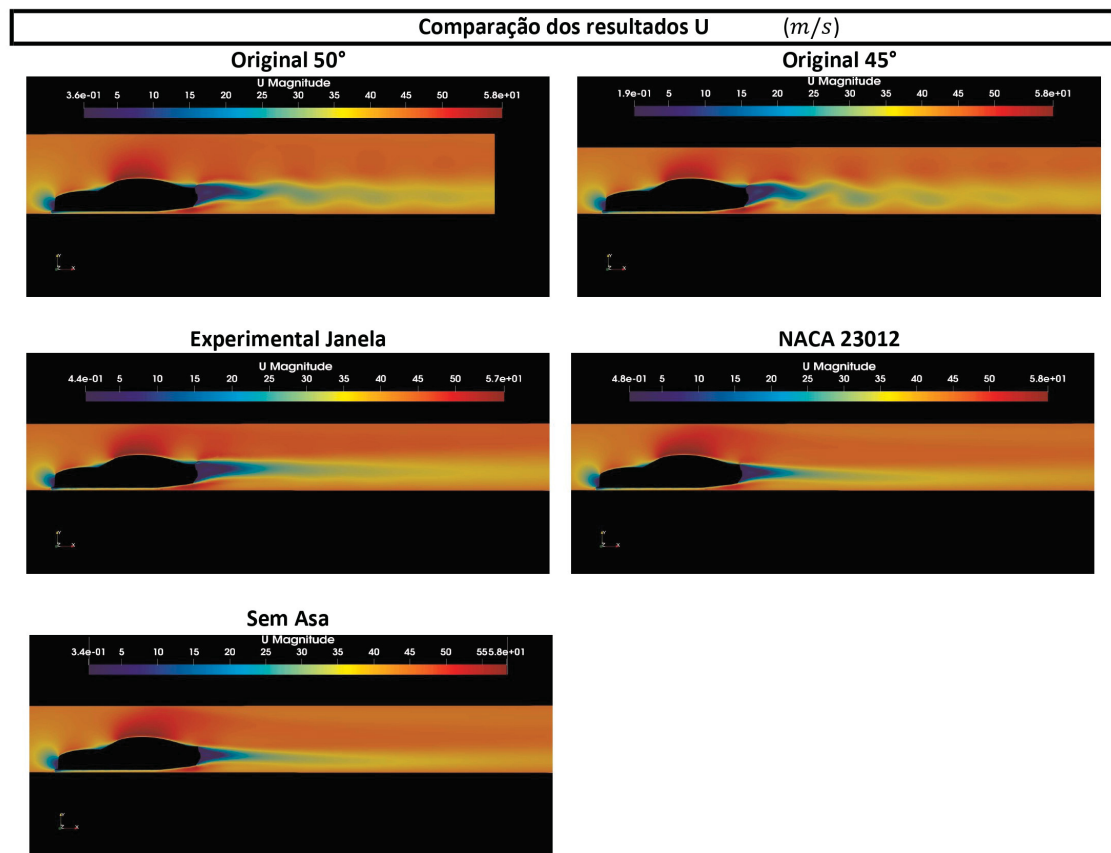
Figura 17 – Resultados Pressão (p)



Fonte: O Autor,2023

Como fica evidente principalmente na comparação entre o perfil sem asa e o original em 45°, existe uma grande diferença de pressão ainda mais acentuada na parte traseira, mostrando que o perfil Original 45° gera mais pressão, por sua vez mais *downforce*.

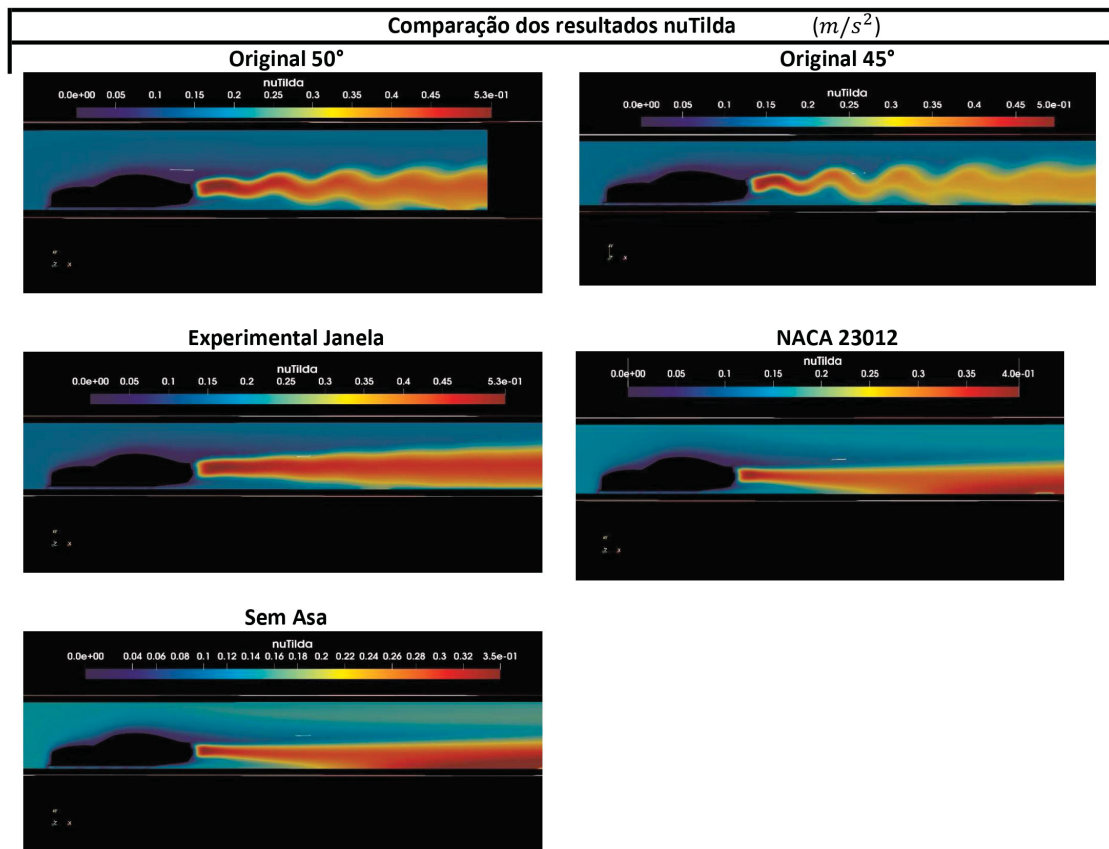
Figura 18 – Resultados Magnitude (U)



Fonte: O Autor, 2023

Esta figura mostra os resultados relativos à velocidade do fluido e seu perfil ao passar pelo veículo, ao compará-los, pode se ver que o escoamento é mais organizado nos perfis NACA 23012, Sem Asa, e Experimental Janela, este último, provando que a abertura no meio do perfil gera um escoamento mais organizado que o perfil completo, originais em 45° e 50°.

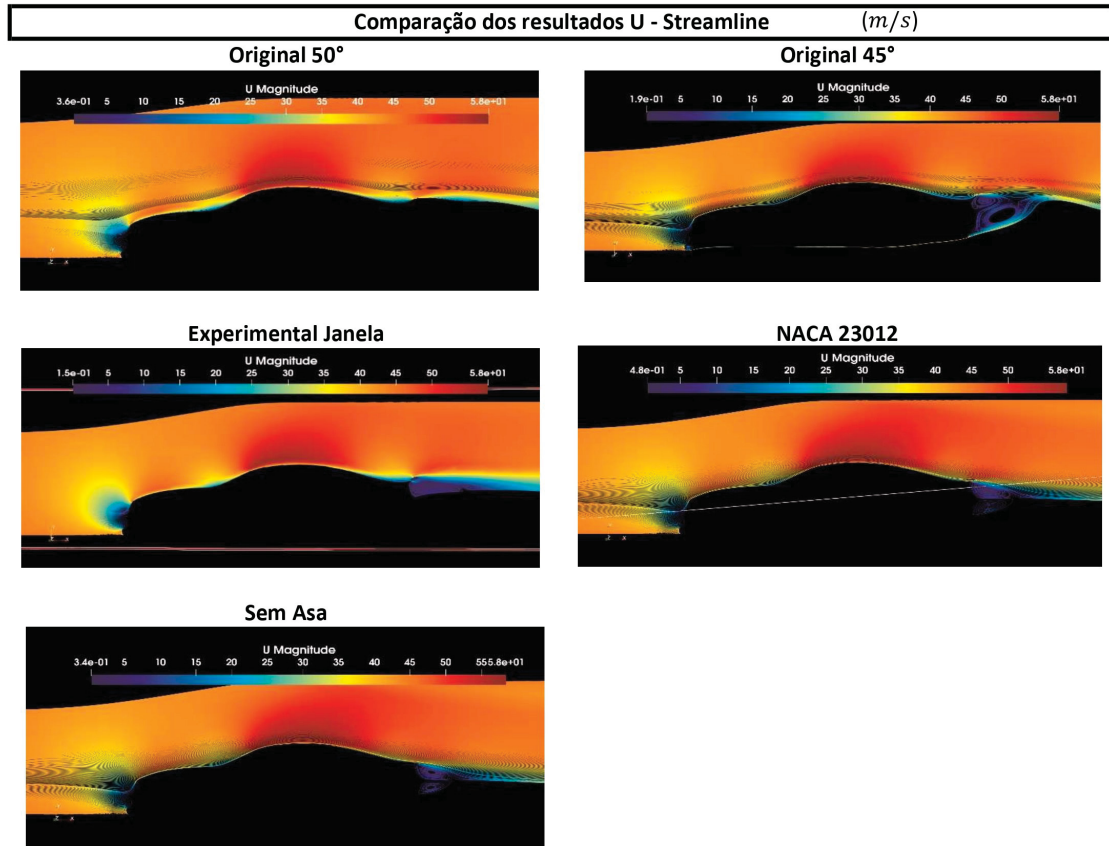
Figura 19 – Resultados Turbulência (nuTilda)



Fonte: O Autor, 2023

Os gráficos de turbulência servem para reforçar as análises feitas a partir dos gráficos de velocidade - U, mostrando a organização gerada a partir da abertura do perfil experimental Janela, ainda que o *downforce* e arrasto não tenham eficiência elevada ou competitiva em relação aos outros, o princípio organizador da abertura se mostrou eficiente.

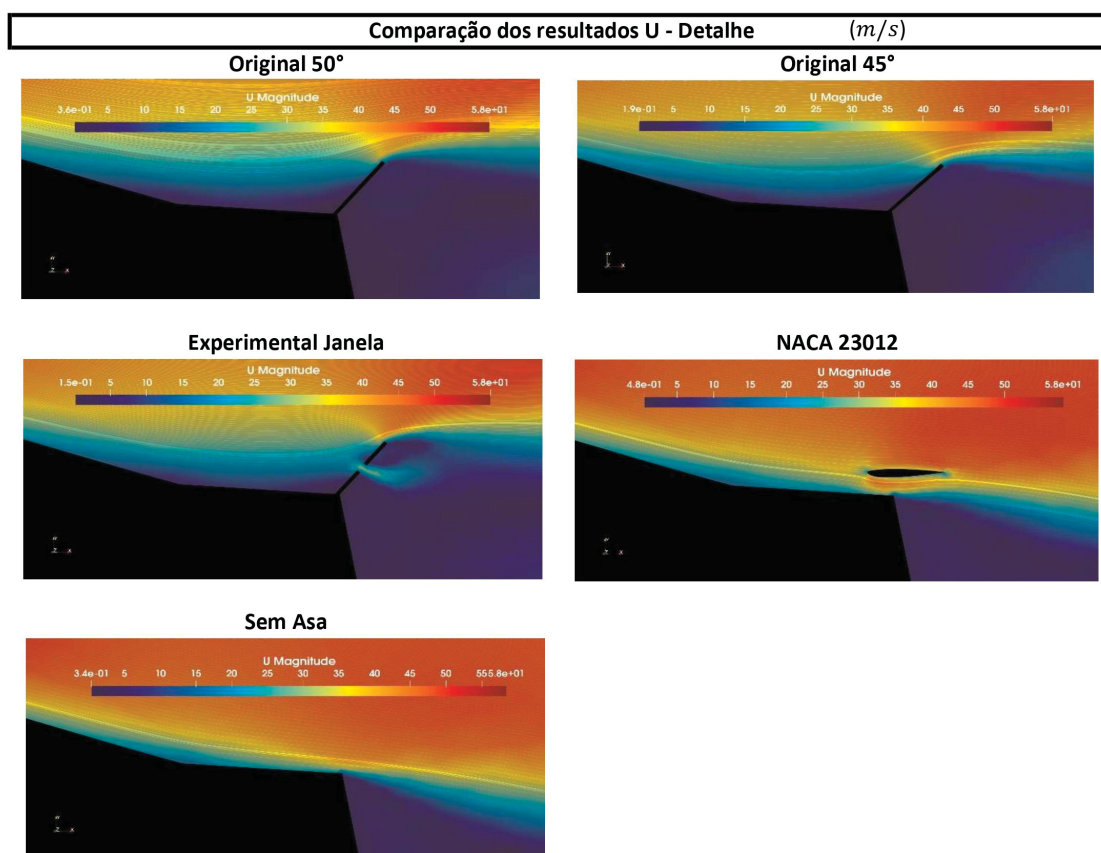


Figura 20 – Resultados U - *Streamline*

Fonte: O Autor,2023

As linhas de fluxo na figura acima demonstram em detalhes os escoamentos em cada tipo de asa escolhida. Tanto no perfil sem asa quanto no perfil NACA 23012, o escoamento se mostra linear e organizado, no primeiro por não ter uma asa para perturbar o fluido, já no segundo por se tratar de um perfil aerodinâmico com ângulo de ataque em  $0^\circ$ , não se faz tão eficiente como se estivesse sendo utilizado com uma maior angulação. O perfil Experimental Janela demonstra a organização do fluido e redução de arrasto.

Figura 21 – Resultados U - detalhe



Fonte: O Autor,2023

Os detalhes de escoamento dos perfis originais em 45° e 50° mostram a pequena diferença gráfica que resulta da diferença numérica entre os dois, no perfil de 45° o fluido é mais incisivo entre a janela traseira e a asa, fazendo com que o mesmo tenha mais aceleração, e ao sair da asa, leva o escoamento mais alto, resultando em mais *downforce* e maior arrasto que o perfil 50° que tem menor incisividade e aceleração do fluido na mesma região.

## 5.1 Tratamento dos dados obtidos

O software Open Foam entrega como resultado, além da parte gráfica, os coeficiente aerodinâmicos, a partir dos quais é possível fazer uma análise utilizando as equações de força de arrasto e força de sustentação mencionadas anteriormente. Organizando os dados temos o seguinte panorama:

Tabela 3 – Resultados

Resultados das simulações					
Perfil	Cd	Cl	Sustentação* <i>Down-force</i> (N)	Arrasto(N)	Eficiência aerodinâmica (Cl/Cd)
Sem asa	0,76	0,45	677,97*	1146,32	0,591428
Orig 45°	0,91	-0,32	482,11	1375,71	0,350444
Orig 50°	0,89	-0,191582	288,63	1340,87	0,215261
Experimental	0,85	-0,17448	262,87	1280,61	0,205271
NACA23012	0,77	0,42	632,77*	1154,18	0,548242

Fonte: O autor,2023

Resultados com \* tratam-se de *downforce* e não de sustentação, porém são positivos devido ao cálculo dos mesmos serem feitos em módulo, impossibilitando um resultado negativo.

## 5.2 Comparação dos resultados

Os resultados obtidos mostraram que os perfis originais são os mais eficientes como visto na tabela 3, não contando com os resultados que geram sustentação, são os maiores valores de eficiência encontrados. O modelo Experimental Janela se mostrou eficiente até certo ponto, pois se comparado ao perfil original em 50°, reduz 60 N de arrasto, a custo de 26 N de *downforce* que também é reduzido, porém, se comparado ao perfil original na posição de 45° seu desempenho é pior, pois reduz 95 N de arrasto a custo de 220 N de *downforce* .

O Perfil Original posicionado em 45° se mostrou o mais eficiente, mesmo sendo o que mais gera arrasto. Sua eficiência se mostrou maior pois a quantidade de *downforce* gerada a mais se sobressai ao aumento de arrasto, compensando a diferença, e possibilitando que a sua utilização, seja indicada inclusive para circuitos em que maiores valores de *downforce* são exigidos, sem grandes prejuízos quanto ao arrasto. Entretanto o perfil original

em  $50^\circ$  é o mais propício para uso em pistas que permitem o uso de menos *downforce*, geralmente circuitos com mais retas e poucas curvas de alta velocidade. O perfil sem asa mostrou-se menos eficiente, gerando inclusive um coeficiente de sustentação positivo, ou seja, empurrando o carro para longe do chão, efeito totalmente contrário ao desejado. O perfil NACA 23012 invertido e com ângulo de ataque em  $0^\circ$ , surpreendentemente mostrou-se menos eficiente que os demais, sendo melhor apenas que o perfil sem asa, porém também gerando um coeficiente de sustentação positivo, menor que o gerado pelo perfil sem asa, porém longe do esperado.

## 6 Conclusão

Foram construídas 5 geometrias diferentes em CAD representando concepções diferentes na utilização da asa traseira de um veículo da categoria NASCAR Brasil, simplificadas a partir de um modelo 3D do veículo, cada uma delas foi subtraída de um túnel de vento experimental e exportada para geração da malha. Após estudo de convergência, foi escolhida a malha que apresentou melhores resultados com menor esforço computacional e replicada nos demais perfis em estudo. Após analisar criteriosamente os resultados, fica claro que a melhor opção dentre os perfis simulados é o modelo original posicionado em 45°. O fato de haver geração de arrasto envolvida não se torna um problema, visto que para o espetáculo, a geração de arrasto funciona muito bem, pois sem nenhum artifício extraordinário como asas móveis e botões de ultrapassagem, esse arrasto cria um vácuo e torna a disputa mais intensa, visto que o veículo atrás não precisa vencer a barreira de ar a sua frente, otimizando o uso da potência do motor fazendo com que consiga maior aceleração e crie uma chance de ultrapassagem. Com a simplificação da geometria, foi notória a melhora que um assoalho completo no veículo poderia trazer, por isso, como sugestão de melhoria, implementar um assoalho traseiro como extrator de ar, visto que na temporada 2023 o mesmo já possui assoalho dianteiro e intermediário. Esta melhoria, derivada a partir da simplificação da geometria complexa do modelo 3D, se mostrou como uma mudança eficiente em todas as simulações, sendo assim a melhor opção para aumento de *downforce*, visto que as simulações comprovaram que o modelo atual de asa traseira foi o melhor avaliado dentre as opções escolhidas.

### 6.1 Recomendações para trabalhos futuros

Para trabalhos que tenham propostas e objetivos similares a este, é recomendado que se tenha um equipamento computacional de desempenho elevado, e assim conseguir simular um modelo mais similar possível ao modelo real, também recomenda-se para trabalhos futuros:

- Aprimorar a malha utilizada na simulação;
- Simular mais modelos NACA com diferentes ângulos de ataque;
- Utilizar softwares comerciais mais intuitivos e usuais;
- Passar para uma simulação em 3D;
- Utilizar melhor equipamento computacional para melhor obtenção de resultados;

- Simular outros tipos de assoalho, com diferentes ângulos de entradas e saídas, para verificar se o ganho em potencial pode ser maior do que alterar a asa traseira.

# Referências

David A. Crolla. *Automotive Engineering, Powertrains, Chassis System and Vehicle Body*. First edition. [S.l.]: Elsevier, 2009. Citado na página 10.

FU, C.; UDDIN, M.; ROBINSON, A. C. Turbulence modeling effects on the CFD predictions of flow over a NASCAR Gen 6 racecar. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, v. 176, 2018. ISSN 01676105. Citado na página 12.

GRANADOS-ORTIZ, F.-J.; MORALES-HIGUERAS, P.; ORTEGA-CASANOVA, J. 3D CFD simulation of the interaction between front wheels&brake ducts and optimised five-element F1 race car front wings under regulations. *Alexandria Engineering Journal*, v. 69, p. 677–698, 4 2023. ISSN 11100168. Citado na página 13.

KATZ, J. *Aerodynamics of race cars*. 2006. Citado na página 12.

KATZ, J.; DYKSTRA, L. Application of computational methods to the aerodynamic development of a prototype race car. In: *SAE Technical Papers*. [S.l.: s.n.], 1994. ISSN 26883627. Citado na página 12.

KIEFFER, W.; MOUJAES, S.; ARMBYA, N. CFD study of section characteristics of Formula Mazda race car wings. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 43, n. 11-12, 2006. ISSN 08957177. Citado na página 12.

NAIDU, S. R. M. et al. Analysis of aerodynamic characteristics of car diffuser for dissimilar diffuser angles on Sedan's using CFD. *Materials Today: Proceedings*, 5 2023. ISSN 22147853. Citado na página 13.

PHILIP J. PRITCHARD; JOHN C. LEYLEGIAN. *Fox and McDonald's INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS*. Eighth edition. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2011. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.

SEWARD, D. *Race Car Design*. [S.l.: s.n.], 2014. Citado 6 vezes nas páginas 10, 15, 16, 17, 18 e 19.

SINGH, A.; JAIN, A.; SHARMA, A. Designing a 3-D Model of Bodywork of a Vehicle with Low Coefficient of Drag and High Downforce. *Materials Today: Proceedings*, v. 28, p. 2197–2204, 2020. ISSN 22147853. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 13.