



**LÚCIO VARGAS DE ALBUQUERQUE NUNES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ASAS NO DESEMPENHO  
AERODINÂMICO DE UM VEÍCULO FÓRMULA SAE**

**LAVRAS – MG  
2022**

**LÚCIO VARGAS DE ALBUQUERQUE NUNES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ASAS NO DESEMPENHO AERODINÂMICO DE  
UM VEÍCULO FÓRMULA SAE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Lavras, como parte  
das exigências do Programa de Graduação em  
Engenharia Mecânica, para a obtenção do  
título de Bacharel

Prof.<sup>o</sup>. Dra. Evelise Roman Corbalan Góis Freire  
Orientador

Prof.<sup>o</sup>. Dra. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira  
Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

**LÚCIO VARGAS DE ALBUQUERQUE NUNES**

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE ASAS NO DESEMPENHO AERODINÂMICO DE  
UM VEÍCULO FÓRMULA SAE**

**STUDY OF THE INFLUENCE OF WINGS ON THE AERODYNAMIC  
PERFORMANCE OF A FORMULA SAE VEHICLE**

Course Conclusion Paper presented to Federal University of Lavras, as part of the requirements of the Graduation Program in Mechanical Engineering, to obtain the title of Bachelor of Science

---

Prof<sup>o</sup>. Dra. Evelise Roman Corbalan Góis Freire  
Orientador

---

Prof<sup>o</sup>. Dra. Bruna Oliveira Passos e Silva Siqueira  
Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, Mario e Gilda, por serem a base da minha vida e por terem me dado todo o amor e suporte que precisei ao longo da minha jornada.

Agradeço à minha namorada e companheira de vida, Ana Paula, por todo o apoio incondicional, amor e paciência na confecção desse trabalho e de todos que fiz desde a sua feliz chegada na minha vida.

Agradeço à minha orientadora, Evelise, por ter sempre acreditado em mim e me dado todas as oportunidades, nada desse projeto seria possível sem ela.

Agradeço ao meu primo, Júlio Antônio por ter feito sempre o papel de irmão mais velho e por todo o apoio que sempre me deu.

Agradeço aos meus avós Valdo e Helena por terem me acolhido sempre com carinho.

Agradeço ao Gabriel por todo o apoio de engenheiro e primo.

Agradeço à professora Andressa Giarola, por ter sido a primeira a me mostrar a minha vocação pela área de exatas e por ter tido tanta paciência comigo nos meus primeiros passos.

Agradeço à minha psicanalista, Maria Eunice, por ter me montado e me remontado várias vezes ao longo do meu caminho.

Agradeço ao professor Jonas por tudo que me ensinou de OpenFOAM® e por ter participado efetivamente dos meus projetos com muita paciência e zelo.

Agradeço também à minha coorientadora, Bruna, por ter dado um toque especial de engenharia mecânica no projeto.

Agradeço ainda aos meus amigos e colegas de curso Luka e Luan por terem me ensinado tanto sobre vários assuntos e por terem participado da minha jornada ao longo da faculdade, tendo sido grandes companhias.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Muito obrigado!

*“Quanto maior o artista, maior a dívida; uma  
confiança perfeita é concedida aos menos  
talentosos como prêmio de consolação.”*  
– Robert Hughes.

## RESUMO

Em competições automotivas, o alto desempenho dos veículos é fundamental. A aerodinâmica vem desenvolvendo há várias décadas o seu papel de aumentar a eficiência. Em competições de Fórmula, onde altas velocidades são desenvolvidas, faz-se necessário o uso de artifícios para manter a estabilidade dos veículos. Uma das formas é através do *downforce* aerodinâmico. O presente trabalho traz uma abordagem de fluidodinâmica computacional (CFD) para estudo de um pacote aerodinâmico, composto por asas traseira e dianteira, em um veículo Fórmula SAE. Com a utilização do pacote, busca-se a geração do *downforce*, melhorando a capacidade de curva do automóvel para altas velocidades. Através do uso do *software* livre OpenFOAM®, foram simulados o modelo do veículo Z04 com pacote aerodinâmico e sem pacote aerodinâmico. Os resultados obtidos para cada modelo foram comparados com o intuito de se entender a influência do pacote. Para compreensão dos fenômenos associados, foram analisados os coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação e os campos de pressão.

**Palavras-chave:** Aerodinâmica. Fórmula. CFD. *Downforce*.

## **ABSTRACT**

In automotive competitions, the high performance of vehicles is fundamental. Aerodynamics has been playing its role in increasing efficiency for several decades. In Formula competitions, where high speeds are developed, it is necessary to use devices to maintain vehicle stability. One way is through aerodynamic downforce. The present work brings a computational fluid dynamics (CFD) approach to study an aerodynamic package, composed of rear and front wings, in a Formula SAE vehicle. With the use of the package, the objective is to generate downforce, improving the car's cornering ability at high speeds. Using the free software OpenFOAM®, the Z04 vehicle model was simulated with and without an aerodynamic package. The results obtained for each model were compared to understand the influence of the package. To understand the associated phenomena, the aerodynamic coefficients of drag and lift and the pressure fields were analyzed.

**Keywords:** Aerodynamics. Formula. CFD. Downforce.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CORTE TRANSVERSAL DE UMA ASA ACOPLADA EM UM CARRO DE CORRIDA.....	12
FIGURA 2 – COMPONENTES DE FORÇAS AERODINÂMICAS .....	12
FIGURA 3 – AUMENTO NA VELOCIDADE MÁXIMA RELATIVA DE CURVA DEVIDO AO <i>DOWNFORCE</i> .....	13
FIGURA 4 – VISTA ISOMÉTRICA DO Z04 SEM PACOTE AERODINÂMICO .....	20
FIGURA 5 – VISTA ISOMÉTRICA DO Z04 COM PACOTE AERODINÂMICO.....	20
FIGURA 6 – DIMENSÕES DO VOLUME DE CONTROLE DO VEÍCULO DE AHMED .....	21
FIGURA 7 – VOLUME DE CONTROLE GERADO PELA FUNÇÃO BLOCKMESH.....	22
FIGURA 8 – VOLUME DE CONTROLE COM A INSERÇÃO DO VEÍCULO (TRISURFACE) .....	22
FIGURA 9 – MALHA 3 VISTA EM DUAS DIMENSÕES .....	24
FIGURA 10 – MALHA 3 VISTA EM TRÊS DIMENSÕES .....	24
FIGURA 11 – MALHA 4 VISTA EM TRÊS DIMENSÕES .....	25
FIGURA 12 – COEFICIENTE DE ARRASTO POR ITERAÇÃO PARA CADA MODELO.....	29
FIGURA 13 – COEFICIENTE DE SUSTENTAÇÃO POR ITERAÇÃO PARA CADA MODELO.....	30
FIGURA 14 – VISTA ISOMÉTRICA DO CAMPO DE PRESSÃO DO Z04 SEM PACOTE AERODINÂMICO	31
FIGURA 15 – VISTA ISOMÉTRICA DO CAMPO DE PRESSÃO DO Z04 COM PACOTE AERODINÂMICO	31
FIGURA 16 – VISTA LATERAL 2D DOS CAMPOS DE PRESSÃO DO Z04 .....	32
FIGURA 17 – LINHAS DE CORRENTE NO CORTE DO PLANO DE SIMETRIA DO Z04 COM PACOTE AERODINÂMICO .....	33
FIGURA 18 – Y+ PARA O Z04 COM PACOTE AERODINÂMICO.....	33
FIGURA 19 – PERFIL TÍPICO DE VELOCIDADE PARA CAMADAS DE CONTORNO TURBULENTO .....	34



## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – MALHAS UTILIZADAS PARA SIMULAÇÃO .....	23
TABELA 2 – TEMPO PARA PROCESSAMENTO DO SIMPLEFOAM.....	27
TABELA 3 – MALHAS UTILIZADAS PARA SIMULAÇÃO E PARA TESTE DE MALHA.....	28
TABELA 4 – Y+ MÉDIO PARA AS MALHAS .....	29
TABELA 5 – COEFICIENTES AERODINÂMICOS OBTIDOS .....	30

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	10
1.1	Aerodinâmica.....	10
1.1.1	Força de arrasto ( $FD$ ): .....	11
1.1.2	Força de sustentação (Fl):.....	11
1.2	Fluidodinâmica Computacional (CFD) .....	14
2	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL AERODINÂMICA DE VEÍCULOS AUTOMOTORES .....	15
3	OBJETIVOS .....	18
3.1	Objetivo Geral .....	18
3.2	Objetivos Específicos .....	18
4	METODOLOGIA .....	19
4.1	Geometrias.....	19
4.2	Volume de controle (BlockMesh) .....	20
4.3	Malhas .....	23
4.4	Condições de Contorno e modelo de turbulência.....	25
4.5	Máquinas Utilizadas .....	25
4.6	Solver.....	26
5	RESULTADOS .....	27
5.1.1	Teste de Malha.....	27
5.2	Simulações.....	29
6	CONCLUSÃO .....	35
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36

## 1 INTRODUÇÃO

O automobilismo é um esporte competitivo e inovador. A Fórmula 1, por exemplo, configura-se como um laboratório onde grandes ideias são transformadas em soluções de engenharia e milhões de dólares são movimentados. A Fórmula SAE tem como objetivo propiciar aos estudantes de engenharia a oportunidade de aplicar na prática conhecimentos adquiridos em sala de aula através da construção de um carro Fórmula.

A fluidodinâmica computacional, nas últimas décadas, vem desenvolvendo um papel importante em competições automotivas, uma vez que, para obter bom desempenho, os veículos devem ser aerodinamicamente eficientes.

O presente projeto visa otimizar a aerodinâmica de um veículo de Fórmula SAE, desenvolvido pela Equipe Zeus da Universidade Federal de Lavras, fundada em 2016 e que produziu 4 modelos de carros de competição de Fórmula SAE. Para tal, foi testado a utilização de um pacote aerodinâmico a partir de simulação numérica. O algoritmo utilizado pelo autor possui o diferencial de ser livre e gratuito, a partir da utilização do software OpenFOAM®.

### 1.1 Aerodinâmica

Segundo a NASA (2011), a aerodinâmica consiste no estudo do movimento do ar (ou outros fluidos gasosos) em relação a um corpo sólido que se movimenta através do mesmo. Na indústria, CFD é muito empregado com o intuito de se entender fenômenos aerodinâmicos, principalmente no desenvolvimento de aeronaves e veículos terrestres (NEBENFUHR, 2010). Com o intuito de desenvolver maior eficiência energética, os veículos necessitam reduzir a resistência aerodinâmica (NEBENFUHR, 2010).

A redução da resistência do movimento de um veículo aumenta a velocidade do mesmo, para um mesmo gasto de energia (combustível) ou reduz o gasto para uma mesma velocidade. Para reduzir tal resistência, deve-se reduzir o arrasto, sendo que um fator importante para este objetivo é a alteração do formato. A força de arrasto é, portanto, função do formato do veículo (JATHAR & BORSE, 2014). Jathar e Borse (2014) chegaram à conclusão de que a redução do arrasto depende da configuração e das dimensões.

### 1.1.1 Força de arrasto ( $F_D$ ):

Consiste na força atuante do ar sobre o corpo do veículo que resiste ao seu movimento. Deve ser considerada no design da parte externa do veículo. O coeficiente de arrasto é adimensional e descreve a resistência aerodinâmica. Pode ser calculado através da Equação 1.1. (JATHAR & BORSE, 2014)

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D A \quad 1.1$$

Onde:

$F_D$  = força de arrasto

$C_D$  = coeficiente de arrasto

$A$  = área frontal do veículo

$V$  = velocidade do escoamento (vento)

$\rho$  = densidade do ar

### 1.1.2 Força de sustentação ( $F_l$ ):

Consiste na força atuante do ar com relação ao veículo que sustenta o mesmo. Tal força possui direção vertical para cima. Para altas velocidades, um veículo pode gerar sustentação elevada e, conseqüentemente, instabilidade (PEHAN e KEGL, 2002). Essa força pode ser calculada através da Equação 1.2. (JATHAR & BORSE, 2014)

$$F_l = \frac{1}{2} \rho V^2 C_l A \quad 1.2$$

Onde:

$F_l$  = força de sustentação

$C_l$  = coeficiente de sustentação

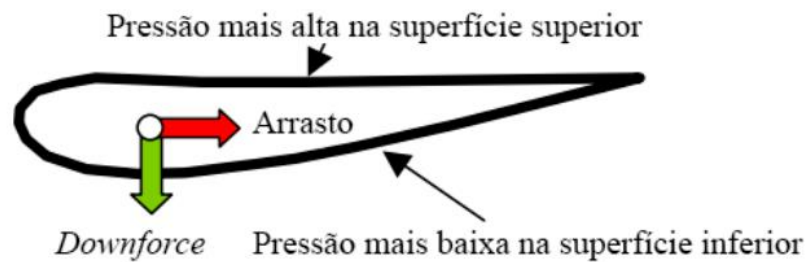
### 1.1.2.1 *Downforce*

Para a aerodinâmica, não há aspecto competitivo com maior influência em performance do que o *downforce*. Nas maiores competições automotivas, incluindo Fórmula 1, Indycars, Fórmula 3000 e Fórmula 3, o *downforce* é o elemento aerodinâmico mais significativo. (PEHAN e KEGL, 2002).

Segundo Fields (2015), os carros de Fórmula 1 podem gerar sustentação suficiente para “voar” quando se encontram a uma velocidade de 100 mph (~161 km/h) caso não tenham *downforce* aerodinâmico.

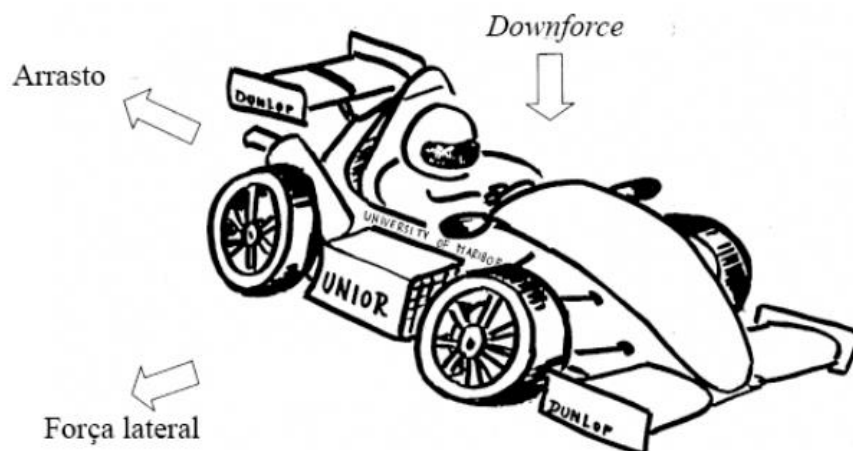
Ao inserir asas no veículo, gera-se *downforce*, porém, cria-se arrasto devido ao aumento de área frontal. Essa geração pode ser vista nas Figuras 01 e 02.

Figura 1 – Corte transversal de uma asa acoplada em um carro de corrida



Fonte: Adaptado de Pehan & Kegl (2002)

Figura 2 – Componentes de forças aerodinâmicas

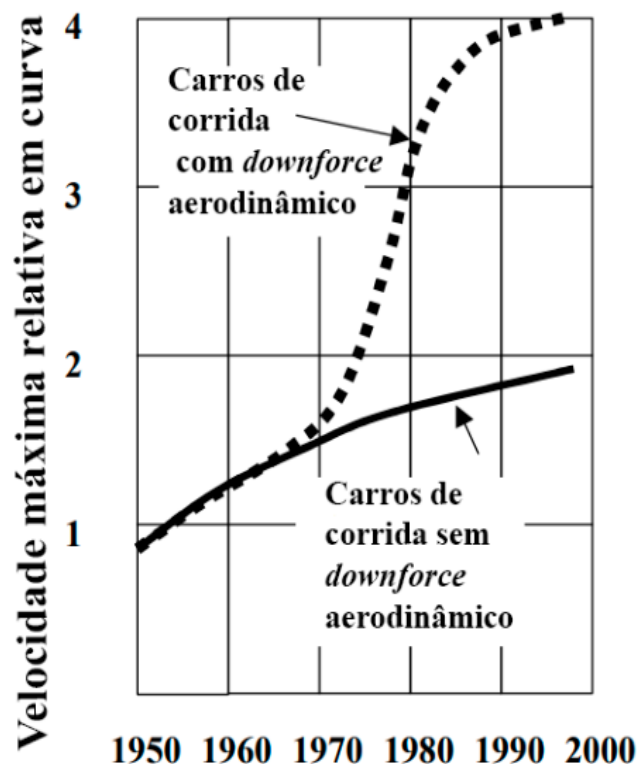


Fonte: Adaptado de Pehan & Kegl (2002)

O *downforce* é capaz de aumentar a capacidade de curva dos pneus. Isso significa que, carros equipados com pacote aerodinâmico são mais capazes de sustentar maior quantidade de forças laterais devido ao *downforce* (PEHAN e KEGL, 2002).

Para demonstrar a influência das asas na capacidade de curva dos carros considera-se o aumento de tecnologia ao longo dos anos. Devido ao aumento na capacidade de curva do veículo, com a adição de um pacote aerodinâmico, observa-se um grande aumento de desempenho em tempo de volta para veículos dotados de pacote, mesmo com o aumento de arrasto gerado devido às asas. Esse comportamento pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Aumento na velocidade máxima relativa de curva devido ao *downforce*



Fonte: Adaptado de Pehan & Kegl (2002)

Na Figura 3, é possível notar um aumento da velocidade relativa para curva ao longo das décadas. a linha sólida é resultado do aumento das tecnologias associadas aos pneus, enquanto a linha tracejada traz a influência da utilização do *downforce* aerodinâmico. A partir de 1979, foram introduzidas as asas nos veículos, o que gerou o maior aumento da capacidade de curva e, conseqüentemente, um aumento de performance dos veículos (PEHAN e KEGL, 2002).

## 1.2 Fluidodinâmica Computacional (CFD)

Desde tempos remotos, o estudo do movimento dos fluidos vem sendo desenvolvido. Relógios movidos a água eram utilizados no Egito antigo, os romanos utilizavam aquedutos para transportar água entre cidades e Aristóteles desenvolveu os princípios da continuidade (FORTUNA, 2000). Apenas em 1586, porém, essa ciência ganhou caráter matemático, quando Simon Stevin publicou *Estática e Hidrostática* (FORTUNA, 2000).

A partir de trabalhos pioneiros dos franceses Claude Navier (1822), Simeon Poisson (1829) e do inglês George Stokes (1845), surgiu-se a dedução matemática do comportamento dos fluidos na forma das Equações de Navier-Stokes (FORTUNA, 2000). Devido ao grau de complexidade dessas equações, por se tratarem de equações diferenciais parciais (EDPs) não-lineares, a obtenção de soluções analíticas só é possível para casos muito simplificados e específicos (FORTUNA, 2000). Dessa forma, faz-se necessárias soluções alternativas para o estudo do movimento de fluidos.

Uma das ferramentas mais utilizadas atualmente para a resolução das Equações de Navier-Stokes consiste na fluidodinâmica computacional (CFD) (FORTUNA, 2000). Essa alternativa consiste em utilizar métodos numéricos computacionais para resolução das equações em questão. As principais vantagens consistem na redução de custos de um projeto de engenharia, por prover uma análise de um fenômeno físico de forma virtual, sem a necessidade de criação de protótipos experimentais (FORTUNA, 2000). Com esse estudo, busca-se encontrar os gradientes de velocidades, pressões e temperaturas na região de um escoamento. A partir dos dados obtidos, o engenheiro pode otimizar o projeto, reduzindo os custos operacionais e melhorando desempenho, além de tornar possível a exploração de fenômenos que não poderiam ser estudados de forma prática em laboratórios (FORTUNA, 2000).

Para resolver um campo de escoamento a partir de CFD, métodos iterativos são utilizados, como é o caso, por exemplo, do SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*). Esse algoritmo determina campos de pressão a partir da discretização das equações de momento (NORTON e SUN, 2006).

## 2 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL AERODINÂMICA DE VEÍCULOS AUTOMOTORES

Diversas abordagens sobre a aerodinâmica de veículos automotores têm sido realizadas no campo científico. Várias delas foram realizadas em *softwares* pagos, como é o caso do Fluent, do CFX e do Star CCM+, como é o caso de Damjanovic et. al. (2011) que utiliza o pacote Ansys e Ahmad et. al. (2010) que utiliza o Star CCM+. Poucos desses estudos, porém, foram realizados através de meios gratuitos, como é o caso do OpenFOAM®. O segundo caso citado, é o foco de estudo deste trabalho.

Nebenfuhr (2010) traz uma comparação do Fluent (software comercial) com o OpenFOAM® (software gratuito). No artigo em questão há um avanço no campo teórico e prático no estudo de CFD aplicado à aerodinâmica. Com o intuito de simular a aerodinâmica de um veículo, o método dos volumes finitos foi utilizado, através de ambos os softwares citados, para encontrar a solução numérica para os problemas (NEBENFUHR, 2010). No artigo de Nebenfuhr (2010), foram utilizados três solvers do OpenFOAM® com o intuito de simular o escoamento. O PotentialFoam foi utilizado para obtenção do campo potencial inicial. O SimpleFoam foi utilizado para resolver o escoamento externo, tanto a parte laminar, quanto a parte turbulenta. O PimpleFoam foi utilizado para resolver a parte transiente. Para o chamado “steady-state incompressible Reynolds Averaged Navier-Stokes” (RANS) foi utilizada uma velocidade de 27,8 m/s; para esse caso. Para o regime transiente, chamado de “incompressible Large Eddy Simulation” (LES), realizado em um Sport Utility Vehicle (SUV), o objetivo é reduzir o nível de ruídos gerados pelo escoamento de ar através dos espelhos laterais e no parabrisa (A-pillar); para tal, portanto, foi utilizada uma velocidade de 39,0 m/s (NEBENFUHR, 2010). Nesse artigo, o SnappyHexMesh é utilizado. A malha é checada através do CheckMesh. O carro utilizado no modelo consiste em uma aproximação do Volvo XC90. A simulação é realizada no SimpleFoam através de um processo de convergência após 1.000 iterações (NEBENFUHR, 2010). Como conclusão da dissertação, chegou-se ao fato de que o OpenFOAM® é capaz de entregar resultados tão bons quanto os do Fluent, apesar de ser necessárias malhas mais refinadas para obter os mesmos resultados. Em outras palavras, em ambos os softwares, foram obtidos resultados bastante satisfatórios. (NEBENFUHR, 2010)

Gagnon e Richard (2010) simularam um perfil aerodinâmico tridimensional. Para tal, foram utilizados o SnappyHexMesh para gerar a malha e o modelo de *k-omega-SST* foi simulado no OpenFOAM® para realizar a simulação. Gagnon e Richard (2010) encontraram,



a partir de um algoritmo de combinação entre o PotentialFoam e o SimpleFoam foi utilizado neste trabalho, diversos valores de coeficientes de arrasto e sustentação para diferentes condições de contorno.

Jathar e Borse (2014) trazem um estudo aerodinâmico utilizando o OpenFOAM® para analisar o escoamento de ar em diferentes geometrias de carros (um sedan e um hatchback). Nesse artigo, o BlockMesh foi utilizado para a criação da geometria e SnappyHexMesh foi utilizado para a geração da malha. O solver utilizado foi o PotentialFoam combinado com o SimpleFoam; para a análise de turbulência, foi utilizado o modelo do *k-omega-SST* e o pós-processamento foi realizado com a utilização do ParaFoam. No processamento, foram geradas simulações para o cálculo de coeficiente de arrasto, coeficiente de sustentação, arrasto e força de sustentação. Como conclusão do artigo em questão, chegou-se a um modelo mais eficiente do ponto de vista da aerodinâmica, no qual o coeficiente de arrasto é reduzido. (JATHAR & BORSE, 2014)

Othmer (2014) traz um estudo aerodinâmico de um carro híbrido Volkswagen XL1 em comparação com um Audi A7 no qual o OpenFOAM® é utilizado. O modelo proposto por Othmer (2014) utiliza o modelo de turbulência *Spalart-Allmaras* e uma malha de baixo Reynolds. O veículo é simulado pela metade com o intuito de reduzir o custo computacional. Os coeficientes de arrasto são calculados e os resultados espelhados. (OTHMER, 2014)

Shinde, Nikam e Aniruddha (2013) trazem a simulação aerodinâmica de três tipos de veículos com perfil *DrivAer*, no qual um deles corresponde ao *Fastback*, outro corresponde ao *Estateback* e outro corresponde ao *Notchback*. Além disso, para cada tipo, têm-se as simulações do perfil mais simples e de um mais detalhado. Para as simulações em questão, foram utilizados o SnappyHexMesh na produção da malha e o modelo de turbulência utilizado foi o *k omega SST*. Para as simulações foram utilizadas as combinações de dois solvers do OpenFOAM®, o PotentialFoam para definição dos domínios de pressão e o SimpleFoam. O modelo se move a 40 m/s (velocidade especificada para a entrada e para a saída do domínio) e as rodas rotacionam no sentido anti-horário a 320 rad/s. Todas as outras partes do carro são definidas como paredes estacionárias. Os modelos considerados foram simulados com 10.000 iterações cada. Diversos resultados foram encontrados para o coeficiente de arrasto em cada modelo. É possível notar que para o modelo *Fastback*, o coeficiente de arrasto foi menor em comparação com os modelos *Noteback* e *Estateback*, respectivamente. O erro encontrado encontra-se dentro de uma banda de 0,5% e 12% em comparação aos modelos experimentais aos quais são fiéis (Audi A4 e BMW3 series), publicados pela Technische Universitat Munchen (TUM); fato que demonstra a fidelidade do

modelo computacional em comparação com o prático (SHINDE, NIKAM, & ANIRUDDHA, 2013).

Körpe, Kanat e Oktay (2019) avaliaram o perfil aerodinâmico de uma asa do tipo NACA 4412 a partir do Ansys Fluent utilizando um modelo de turbulência mais robusto para resolução de um regime transiente, o  $\gamma - Re_{\theta} SST$ . A ferramenta do  $y^+$  foi utilizada tanto por ter um campo inicial diretamente proporcional ao do modelo de turbulência utilizado, quanto para tornar os resultados mais compreensíveis e garantir a qualidade da malha para cada contorno. Como conclusão, os autores chegaram que campos iniciais de  $y^+$  possuem correlação com os cálculos de forças aerodinâmicas como o arrasto e a sustentação.

Um fenômeno de interesse que pode ser observado com o intuito de compreender as regiões do escoamento, estudado muito principalmente em design de aeronaves, é o efeito Coanda. As regiões do escoamento possuem grande influência na produção de arrasto e na força de sustentação associado às asas, portanto, sua compreensão torna-se interessante (SIMPSON, AHMED e ARCHER, 1999).

Nunes, Freire e Ansoni (2022) utilizaram o SnappyHexMesh para gerar uma malha computacional e uma combinação dos solvers PotentialFoam e SimpleFoam do OpenFOAM® para simular a aerodinâmica do modelo Z03 do veículo de Fórmula SAE da Universidade Federal de Lavras. O modelo de turbulência utilizado foi o  $k-\omega-SST$  e a ordem de convergência foi de  $10^{-3}$  para campos de pressão e velocidade e de  $10^{-4}$  para parâmetros de turbulência ( $k$  e  $\omega$ ) O algoritmo utilizado no artigo em questão, é base para o presente trabalho.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo Geral**

Este trabalho consiste em simular a utilização de um pacote aerodinâmico, composto por uma asa frontal e uma asa traseira, no veículo de Fórmula SAE da Equipe ZEUS, o Z04, da Universidade Federal de Lavras, com o intuito de gerar *downforce* para o modelo. Os resultados encontrados são comparados com o modelo sem o pacote aerodinâmico com o objetivo de compreender a influência do mesmo no desempenho do veículo.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

Busca-se, para compreensão da influência do pacote, avaliar as diferenças dos coeficientes de arrasto e sustentação obtidos para os modelos com pacote aerodinâmico e sem pacote aerodinâmico. Os campos de pressão também são avaliados com o intuito de entender as forças associadas à aerodinâmica dos modelos.

Para as simulações, buscou-se a realização de uma metodologia livre e gratuita, a partir da utilização do SnappyHexMesh e do OpenFOAM®.

## 4 METODOLOGIA

Para avaliação da utilização de um pacote aerodinâmico no veículo, buscou-se simular o mesmo sem pacote e com pacote para fins comparativos. Para compreensão dos fenômenos aerodinâmicos, os coeficientes de arrasto e sustentação foram avaliados. Para o modelo com pacote aerodinâmico, busca-se um coeficiente de sustentação negativo, pois o mesmo altera o sentido da força e gera *downforce*.

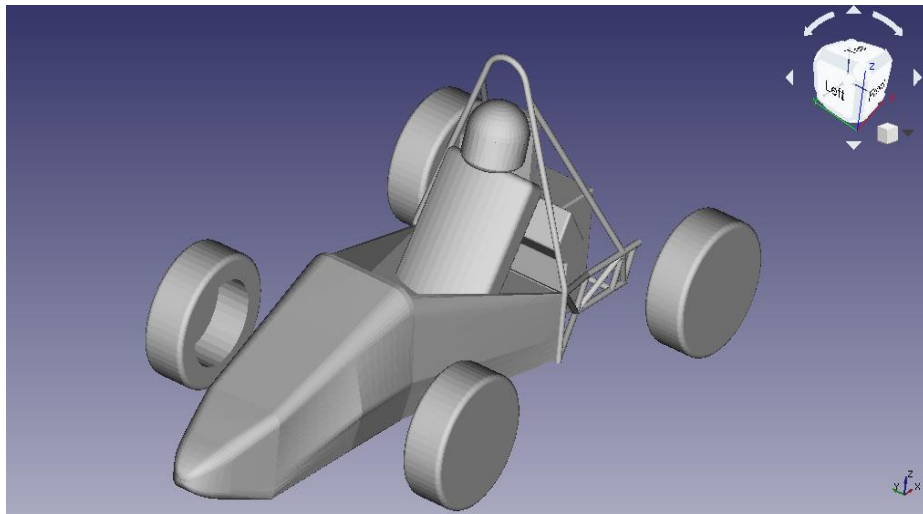
As geometrias foram fornecidas pela Equipe Zeus, as malhas confeccionadas a partir do SnappyHexMesh, gerador de malhas do OpenFOAM® e os solvers foram resolvidos a partir do OpenFOAM® v7.

### 4.1 Geometrias

As geometrias foram desenvolvidas utilizando o ambiente computacional SolidWorks Premium 2018 x64 Edition. As mesmas foram desenvolvidas e fornecidas pelo projeto ZEUS da Universidade Federal de Lavras (UFLA), conforme as Figuras 4 e 5.

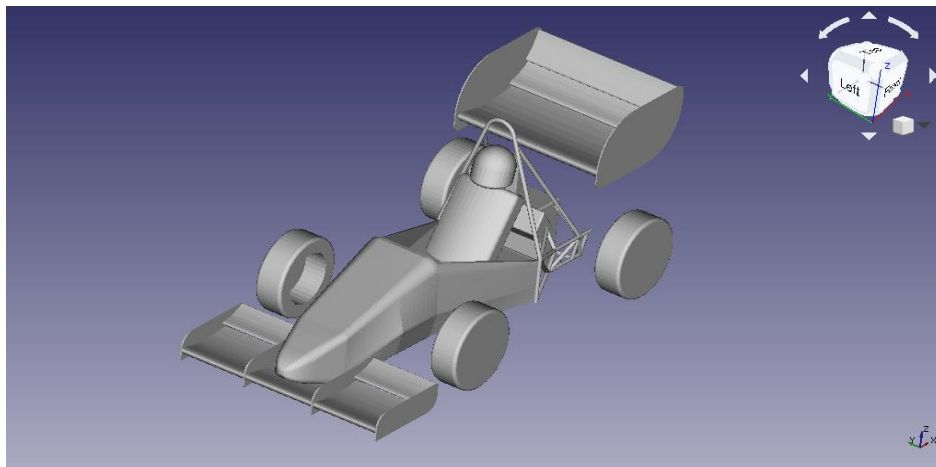
O carro possui 1377,02 mm de altura no seu ponto máximo, 2735,55 mm de comprimento e 1157,7 mm de largura. O chassi é feito de tubos de aço SAE 1020. O bico e as carenagens laterais são laminados com fibra de vidro e resina poliéster. Cabe ressaltar que os mesmos são bem lixados e envelopados e, portanto, para fins de simulação, foram modelados como superfícies lisas. A diferença entre as duas geometrias encontra-se apenas na presença do pacote aerodinâmico. Dessa forma, é possível avaliar apenas o efeito do mesmo na aerodinâmica do veículo.

Figura 4 – vista isométrica do Z04 sem pacote aerodinâmico



Fonte: do Autor (2022)

Figura 5 – vista isométrica do Z04 com pacote aerodinâmico



Fonte: do Autor (2022)

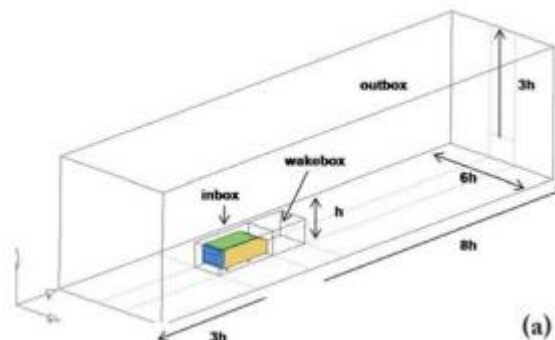
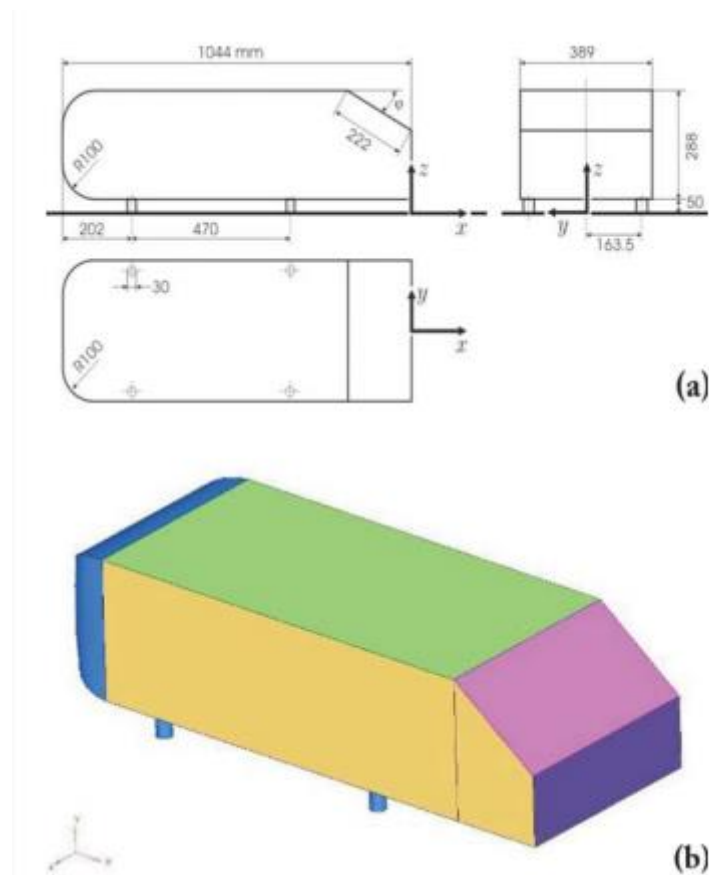
#### 4.2 Volume de controle (BlockMesh)

Para realização de casos de escoamento externo, é necessária a geração de um volume de controle. Para casos aerodinâmicos, esse volume fará um papel similar a um túnel de vento.

No OpenFOAM®, esse volume é gerado pela função BlockMesh. Essa função, além de gerar o bloco, nomeia as faces de entrada (inlet) e saída (outlet), bem como as faces laterais.

Para a confecção do volume de controle, em casos aerodinâmicos, as dimensões são pré-definidas e relativas às dimensões do veículo (SINGH, 2011). As dimensões adequadas, comparadas com um veículo de Ahmed, que consiste em um modelo simplificado para estudos aerodinâmicos, podem ser vistas na Figura 6.

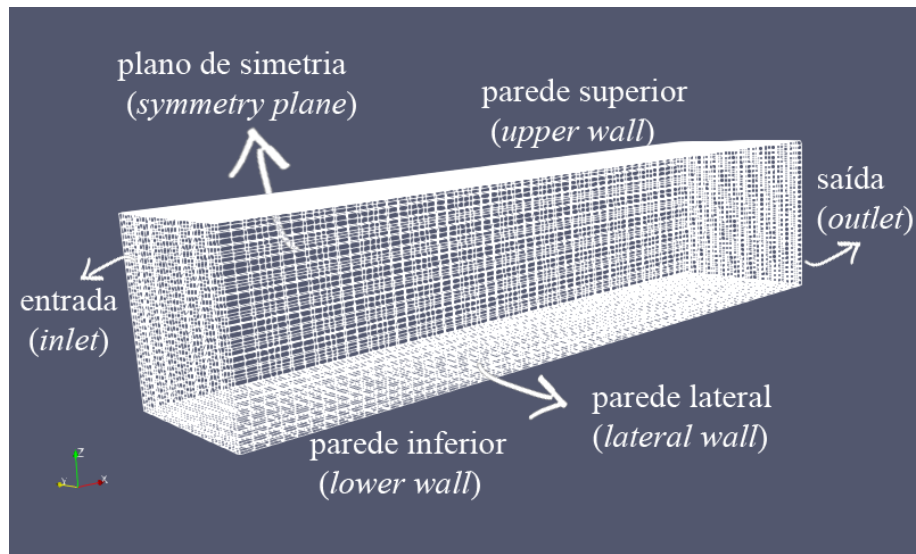
Figura 6 – Dimensões do volume de controle do veículo de Ahmed



Fonte: Singh (2011)

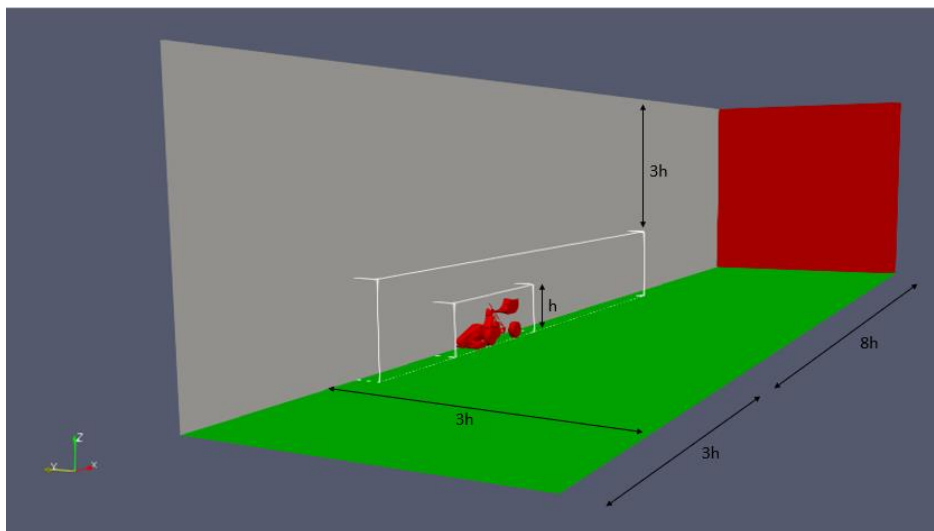
Para o veículo Fórmula em questão, foi utilizado um plano de simetria com o intuito de reduzir o custo computacional do processo, portanto, utilizou-se metade das dimensões. Assim, o BlockMesh foi dimensionado com base na altura do carro. O BlockMesh utilizado pode ser visto na Figura 7 e possui dimensões de (35,8 x 8,16 x 8,2) m. Na Figura 7, é possível visualizar também as entradas (*inlet*) e saída (*outlet*) de ar, bem como as paredes. O volume de controle do modelo gerado encontra-se na Figura 8.

Figura 7 – Volume de controle gerado pela função BlockMesh



Fonte: do Autor (2022)

Figura 8 – Volume de controle com a inserção do veículo (TriSurface)



Fonte: do Autor (2022)

Cabe ressaltar que a função TriSurface foi responsável pela inserção das geometrias nos volumes de controle. Foram ainda definidas duas caixas de refinamento, uma compreendendo a região ao redor do veículo e outra compreendendo uma região próxima onde há mais fenômenos associados ao escoamento. Ambas encontram-se mostradas na Figura 9.

### 4.3 Malhas

As malhas computacionais foram geradas a partir do BlockMesh e do SnappyHexMesh, gerador de malhas do OpenFOAM®. Para o modelo com pacote aerodinâmico, foram geradas três malhas com diferentes níveis de refinamento. Para o modelo sem pacote, foram utilizados os mesmos parâmetros da malha mais refinada. A malha mais grosseira foi denominada de malha 1, a intermediária de malha 2 e a mais refinada de malha 3. A malha do modelo sem pacote é a malha 4. A quantidade de elementos de cada malha pode ser visualizada na Tabela 1.

Tabela 1 – Malhas utilizadas para as simulações

<b>Malha</b>	<b>Número de elementos</b>
1	890141
2	1460442
3	2519510
4	2121266

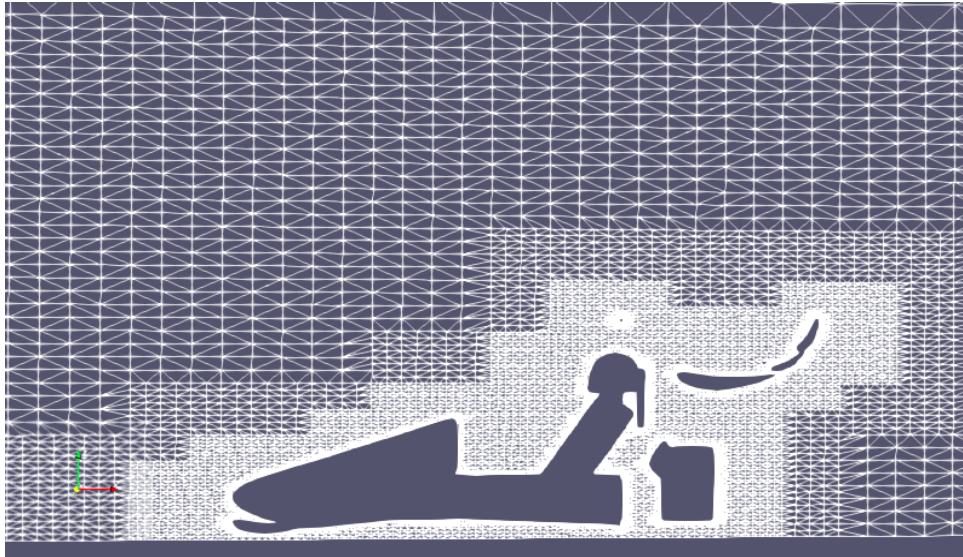
Fonte: do Autor (2022)

Tal procedimento foi feito com o intuito de gerar um teste de malha. Esse teste é capaz de, além de garantir exatidão dos resultados numéricos, fornecer a malha com melhor custo-benefício de execução para o modelo, visto que, em alguns casos, malhas refinadas demais, podem não prover resultados necessariamente mais precisos, mas gerar um maior gasto computacional. Cabe ressaltar que a escolha por apenas uma malha para o modelo sem pacote se deve ao fato de que o mesmo possui geometria mais simples e, portanto, malhas capazes de rodar simulações para o veículo com pacote aerodinâmico serão capazes de rodar simulações para o veículo sem o mesmo.



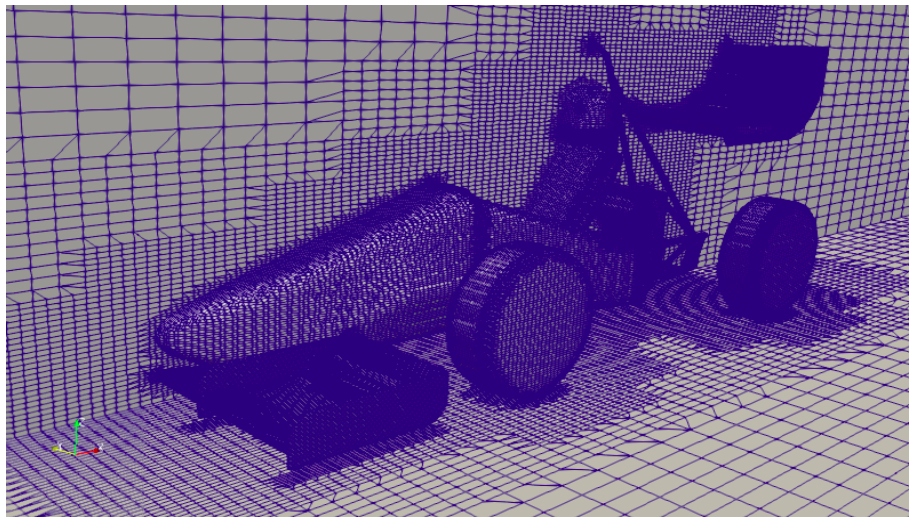
A malha 3 pode ser vista na Figura 9 em duas dimensões e na Figura 10 em três dimensões.

Figura 9 – Malha 3 vista em duas dimensões



Fonte: do Autor (2022)

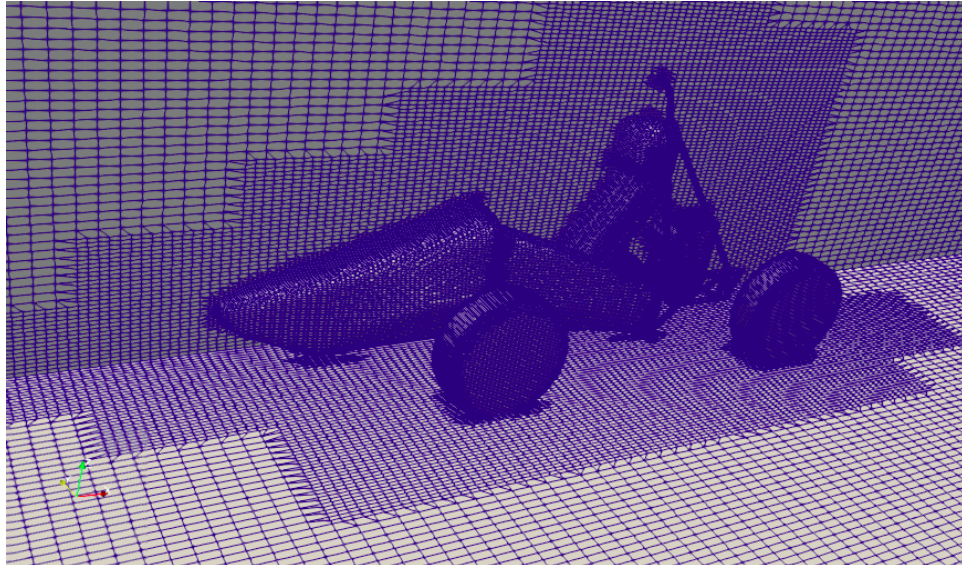
Figura 10 – Malha 3 vista em três dimensões



Fonte: do Autor (2022)

A malha 4 é um pouco menor do que a malha 3 devido à não existência dos detalhes da geometria das asas e, portanto, a ausência de necessidade de refinamento excessivo nesta região do escoamento. A malha 4 pode ser vista em três dimensões na Figura 11.

Figura 11 – Malha 4 vista em três dimensões



Fonte: do Autor (2022)

#### 4.4 Condições de Contorno e modelo de turbulência

Para realização das simulações, utilizou-se a velocidade de escoamento de 14,4 m/s (51,84 km/h). Essa escolha foi feita levando em conta uma média de velocidade de prova atingida ao longo de competições de Fórmula SAE em provas de aceleração, teste de frenagem e *autocross*.

O modelo de turbulência utilizado foi o *k-omega SST*. Essa escolha se deu por se tratar de um modelo mais robusto, capaz de prover bons resultados para pequenos e grandes turbilhões, bem como compreender fenômenos de parede (WILCOX, 2006). A energia cinética de turbulência adimensional (*turbulentKE*) utilizada foi de 0,24, assim como o valor de 1,78 para *omega* conforme o valor padrão do OpenFOAM®. A viscosidade cinemática do ar foi definida como  $1,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , que consiste no valor aproximado a 20 °C (ÇENGEL e BOLES, 2017). O ar foi modelado como fluido newtoniano.

#### 4.5 Máquinas Utilizadas

Para gerar as malhas, configurar os casos e processar o PotentialFoam, foi utilizado um notebook Aspire 5 A515-52G com processador Intel® Core™ i5-3230M CPU @ 2.60GHz.

Para processamento do SimpleFoam, por se tratar de um *solver* mais robusto, foi utilizado o Cluster do Laboratório de Computação Científica (LCC) da UFLA. O mesmo utiliza um CentOS Linux 7.4.1708. A nó cabeça possui processador Intel(R) Xeon(R) CPU X5670 2.93GHz, com 16GB de memória RAM e 1TB de HD. Os nós computacionais possuem processador Intel(R) Xeon(R) CPU X5660 2.93GHz, com 16GB de memória RAM e 500GB de HD.

#### 4.6 Solver

O algoritmo do OpenFOAM® baseia-se em derivar a equação da energia mecânica usando a equação de momento. A derivação é dividida em duas partes, onde a primeira utiliza o método dos volumes finitos para derivar a conservação de energia cinética (HOLZMANN, 2016). O método dos volumes finitos utiliza uma discretização em volumes de controle, para realização da simulação numérica (EYMARD, GALLOUET e HERBIN, 2000).

O PotentialFoam tem a função de gerar um escoamento inicial potencial, com o intuito de prover um campo aproximado da realidade e reduzir o trabalho do solver seguinte (PORCAR, TOET e GAMEZ-MONTERO, 2021). O PotentialFoam, por ser mais leve, no trabalho, o tempo de execução foi entre 8 e 35 segundos de processamento utilizando o cluster do LCC.

Para resolução das Equações de Navier-Stokes, o SimpleFoam possui um algoritmo que se utiliza de técnicas numéricas para resolver os campos de pressão e momento (HOLZMANN, 2016).

O SimpleFoam considera regime permanente e incompressível para a resolução das equações da continuidade. As mesmas encontram-se representadas pelas Equações 4.1 e 4.2 (OPENCFD LTD., 2018).

$$\nabla \cdot u = 0 \quad 4.1$$

$$\nabla \cdot (u \times u) - \nabla \cdot R = -\nabla p + S_u \quad 4.2$$

Onde:

$u$  = velocidade

$p$  = pressão cinemática

$R$  = tensor de tensões

$S_u$  = fonte de momento

O SimpleFoam então foi processado em paralelo no cluster do LCC para prover os resultados de turbulência, coeficientes aerodinâmicos e campos de velocidades e pressões. Para o campo de pressão, foi utilizado o método do gradiente pré-condicionado conjugado (PCG) com o pré-condicionador Diagonal Incompleto Cholensky (DIC), que considera matrizes simétricas. Para os campos e velocidades e parâmetros de turbulência foram utilizados o gradiente pré-condicionado bi-conjugado (PBiCG) com um pré-condicionador diagonal incompleto LU (DILU) que considera matrizes assimétricas. Esses métodos foram setados no *fvsolution* do OpenFOAM®.

Para todas as simulações, o critério de convergência para pressão e velocidade foi de  $10^{-3}$  como desenvolvido por Guerrero e Castilla (2020). Para os parâmetros de turbulência  $k$  e  $\omega$ , o critério de convergência utilizado foi de  $10^{-4}$ .

O tempo de processamento para a malha de referência (malha 1) e a malha mais refinada (malha 3), bem como para o carro sem pacote aerodinâmico (modelo comparativo) encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Tempo para processamento do SimpleFoam

<b>Modelo</b>	<b>Tempo de Processamento [s]</b>	<b>Número de iterações</b>
Malha 1	1238,25	286
Malha 3	4361,88	414
Malha 4	4463,32	521

Fonte: do Autor (2022)

## 5 RESULTADOS

### 5.1.1 Teste de Malha

Buscou-se realizar um teste de malha com o intuito de validar os resultados e descobrir qual malha é a mais adequada para o modelo, visto que, em alguns casos, malhas mais

refinadas não provêm resultados muito mais precisos, porém, podem aumentar o custo computacional

Para avaliação do percentual erro, foi utilizada a Equação 5.1. (ROACHE, 1999)

$$\%ER_j = \frac{|X_j^i - X_j^{base}|}{|X_j^{base}|} \times 100 \quad 5.1$$

Onde:

X = coeficiente de arrasto no ponto j;

i = índice;

base = malha de base escolhida para fins de cálculo do erro a qual foi a mais refinada.

As malhas utilizadas, bem como seus elementos e os respectivos erros, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Malhas utilizadas para simulação e para teste de malha

Malha	Número de elementos	Erro relativo (%)	Número de iterações
1	890141	0,43	286
2	1460442	5,70	983
3	2519510	Malha base	414

Fonte: do Autor (2022)

Observou-se um erro relativo extremamente baixo entre a malha 1 e a malha 3 e o número de iterações foi menor, portanto, recomenda-se a utilização da malha 1, uma vez que a mesma é capaz de prover resultados quase tão precisos quanto a malha 3, porém com menor esforço computacional e com menor quantidade de iterações.

A ferramenta do  $y^+$  consiste em uma dependência da distância da parede, da viscosidade cinemática, da densidade do fluido e da tensão de cisalhamento e descreve o quão fina é a malha. Quanto menores os valores, maior a capacidade da malha de capturar detalhes do fluxo em paredes e obstáculos (NUNES, FREIRE e ANSONI, 2022).

Para as malhas em questão, os valores de  $y^+$  médio foram calculados a partir da função de pós-processamento *yPlus* do OpenFOAM®. Os mesmos encontram-se na Tabela 04.

Tabela 4 –  $y^+$  médio para as malhas

Malha	$y^+$ médio
1	82,98
2	100,63
3	84,11

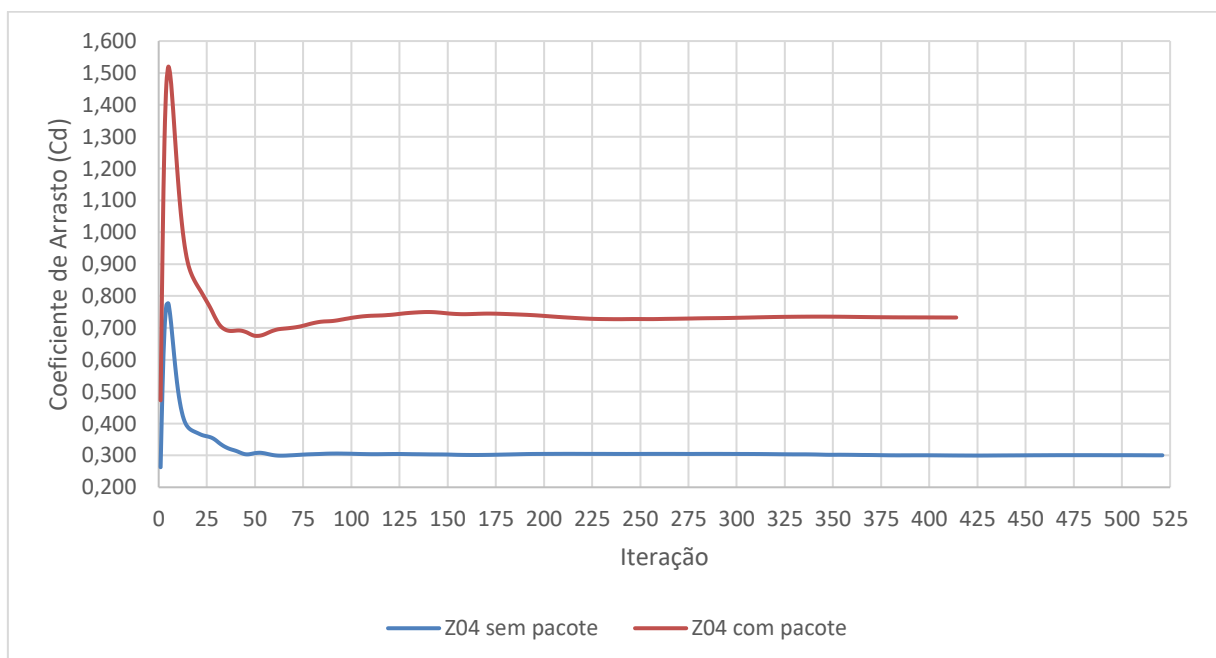
Fonte: do Autor (2022)

O melhor valor médio de  $y^+$  foi justamente o da malha de referência, confirmando a hipótese de que a mesma consiste na melhor malha. A pior malha se mostrou a intermediária (malha 2), tendo o valor mais alto de  $y^+$ , uma maior quantidade de iterações para atingir a convergência e os valores menos precisos quando comparados com a malha de base para cálculo do erro (malha 1).

## 5.2 Simulações

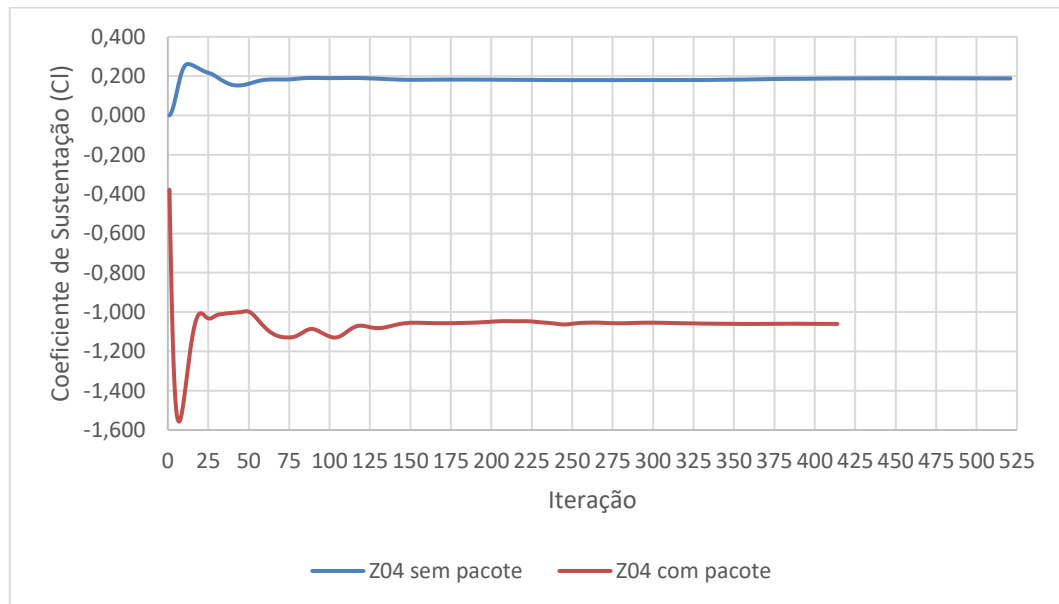
Realizadas as simulações, foram obtidos os dados de coeficientes de arrasto e sustentação. Dos dados de coeficientes para as malhas 3 e de comparação, plotou-se um gráfico de cada um desses coeficientes por iteração, comparados por modelo. Os gráficos encontram-se nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Coeficiente de arrasto por iteração para cada modelo



Fonte: do Autor (2022)

Figura 13 – Coeficiente de sustentação por iteração para cada modelo



Fonte: do Autor (2022)

Obteve-se os valores de coeficiente de arrasto e de sustentação após a convergência das malhas 3 e comparativa. Os resultados para os coeficientes de arrasto e sustentação podem ser vistos na Tabela 5.

Tabela 5 – Coeficientes aerodinâmicos obtidos

<b>Coeficiente</b>	<b>Z04 com pacote</b>	<b>Z04 sem pacote</b>
Arrasto (Cd)	0,732	0,300
Sustentação (Cl)	-1,060	0,188

Fonte: do Autor (2022)

Os resultados encontrados de coeficientes aerodinâmicos seguem a tendência esperada. O *downforce* foi produzido, conforme pode ser visto no valor negativo de coeficiente de sustentação na simulação do carro com pacote aerodinâmico. Em contrapartida, o arrasto aumentou; isso se deve ao aumento da área frontal do carro com a adição do pacote aerodinâmico.

Com o intuito de visualizar o *downforce*, foi gerado o gradiente de pressões em ambos os veículos nas vistas isométricas. Ambos estão mostrados nas Figuras 14, 15 e 16. Cabe ressaltar que, para as plotagens 3D, foi utilizada a função *reflect* do ParaView, com o intuito



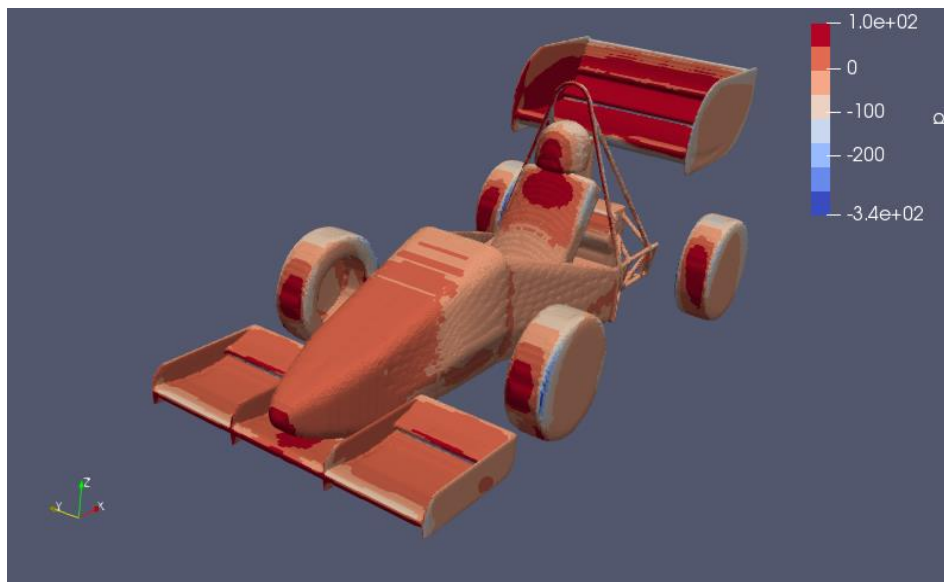
de eliminar a parede de simetria e gerar o panorama completo do carro a partir da reflexão da simulação ao longo do eixo y.

Figura 14 – Vista isométrica do campo de pressão do Z04 sem pacote aerodinâmico



Fonte: do Autor (2022)

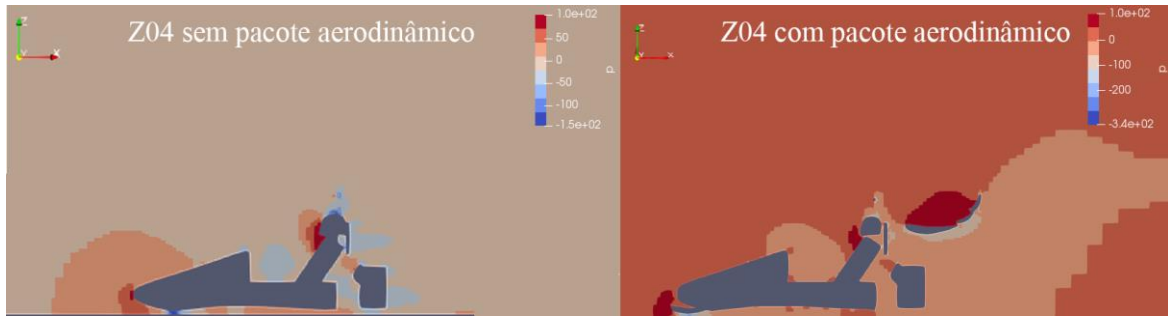
Figura 15 – Vista isométrica do campo de pressão do Z04 com pacote aerodinâmico



Fonte: do Autor (2022)



Figura 16 – Vista lateral 2D dos campos de pressão do Z04

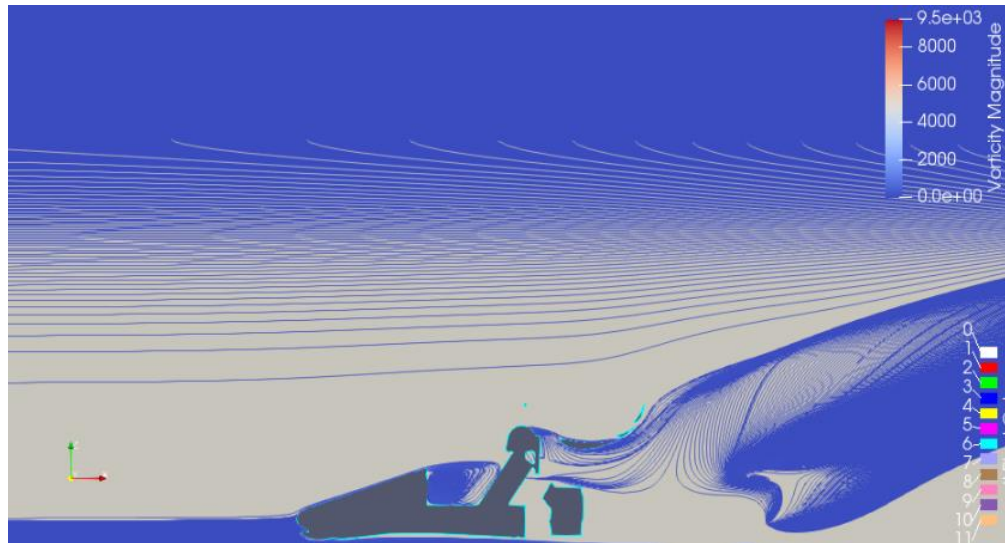


Fonte: do Autor (2022)

Das Figuras 14, 15 e 16, é possível notar a influência do pacote aerodinâmico. Na Figura 16, nota-se zonas de baixa pressão de ar na parte inferior das asas traseira e dianteira. A maior pressão na parte superior das asas é responsável por gerar o *downforce* com relação à pista. Devido à Terceira Lei de Newton, o ar irá gerar uma força para baixo na asa e a asa irá gerar uma força para cima na asa (OXYZOGLU, 2017). O ar será ainda acelerado pela asa e, segundo o princípio de Bernoulli, a pressão e a velocidade do escoamento são inversamente proporcionais (OXYZOGLU, 2017). Tais fenômenos explicam as zonas de baixa pressão na parte inferior da asa.

Para melhor visualização do escoamento no veículo com pacote, utilizou-se linhas de corrente plotadas, a partir de um corte no plano de simetria. Tal comportamento encontra-se na Figura 17.

Figura 17 – Linhas de corrente no corte do plano de simetria do Z04 com pacote aerodinâmico

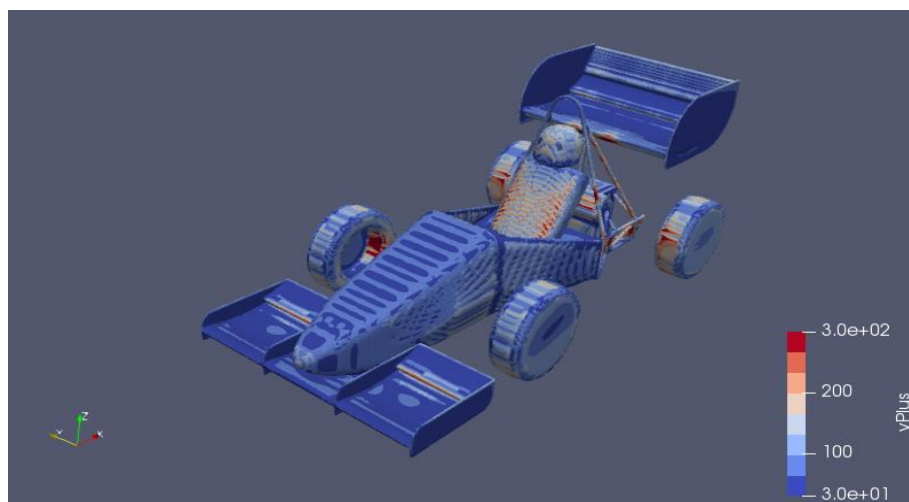


Fonte: do Autor (2022)

A partir da Figura 17, através da observação das linhas de corrente, é possível notar uma recirculação de ar dentro do cockpit do piloto. Após a passagem do fluido pelo veículo, observa-se o Efeito Coanda. Segundo Soares (2001) “esse efeito consiste no fato de que um jato de fluido, neste caso o ar, permanece colado à superfície de um corpo sólido quando soprado sobre este”.

Com o intuito de conhecer melhor os fenômenos de parede, bem como validar os resultados, foi plotado o  $y^+$  para a malha 3, conforme pode ser visto na Figura 18.

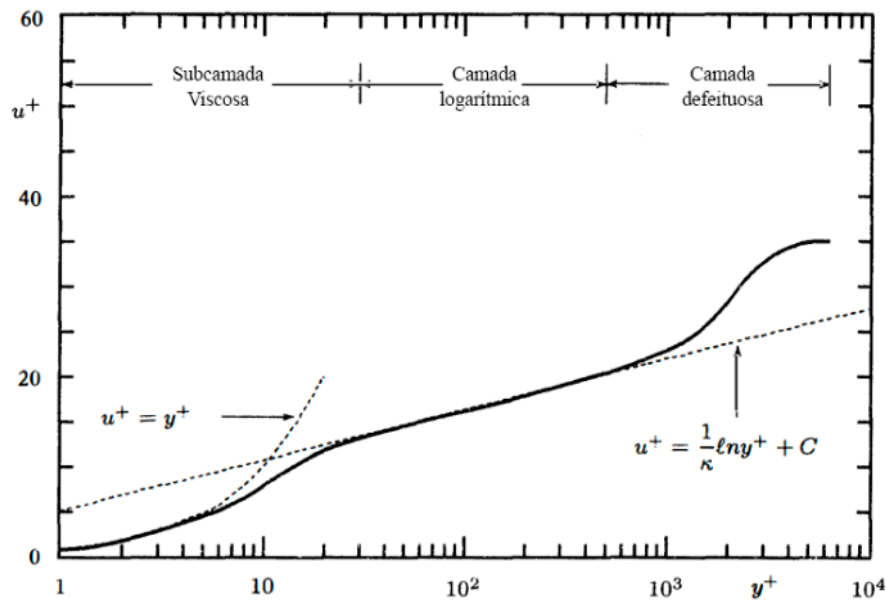
Figura 18 –  $y^+$  para o Z04 com pacote aerodinâmico



Fonte: do Autor (2022)

De Salim e Cheah (2014), valores de  $y^+$  acima de 30, vistos ao longo de toda a geometria, para tratamento próximo de parede, corresponde a regiões plenamente turbulentas. Para *high* Reynolds o  $y^+$  para células devem encontrar-se entre 30 e 300 para obtenção de resultados conclusivos de fricção de paredes (SALIM e CHEAH, 2009). Para fins comparativos para um modelo *high* Reynolds, traz-se a Figura 20.

Figura 19 – Perfil típico de velocidade para camadas de contorno turbulento



Fonte: Adaptado de Wilcox (2006)

O  $y^+$  turbulento, deve estar na região de camada logarítmica, visto que essa região é próxima suficiente de superfície para se ter efeitos viscosos e a tensão produzida é desprezível quando comparado com a tensão de Reynolds (WILCOX, 2006). Tais valores encontram-se entre 30 e 300, validando os valores obtidos de  $y^+$ .

## 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi realizada a comparação entre os modelos do Z04 com pacote aerodinâmico e sem pacote aerodinâmico. A análise dos modelos foi realizada a partir dos coeficientes aerodinâmicos de arrasto e sustentação, bem como a análise dos campos de pressão.

Os dados aerodinâmicos obtidos a partir de análise numérica encontram-se dentro do esperado quando se utiliza um pacote aerodinâmico composto por asas. Sabe-se que o *downforce* é capaz de melhorar o carro em sua habilidade de *cornering*, que consiste na capacidade do veículo de realizar curvas, tornando-o mais estável. Apesar disso, constata-se, como esperado, um aumento no arrasto, que o torna menos eficiente em retas. Dessa forma, faz-se interessante, para trabalhos futuros, uma simulação de volta modelada conforme às pistas de prova da SAE, ou seja, é interessante simular as condições da pista, bem como o movimento do carro através da mesma, em softwares apropriados, como o CarSim. Essa simulação é capaz de prover resultados de tempo mínimo de prova para o modelo, podendo validar a prática da utilização do pacote no veículo e se tal utilização é capaz de melhorar o desempenho na competição.

Cabe ressaltar ainda que a produção de uma asa adequada necessita de recursos financeiros para aquisição de fibra de carbono para laminação do pacote, o que no momento não se encontra disponível para a Equipe Zeus.

Dessa forma, na teoria, a utilização do pacote mostra-se promissora, porém, na prática, há ainda vários desafios a serem superados no sentido de utilizar um pacote aerodinâmico no Z04.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABILGAZIYEV, A.; NOGERBEK, N.; ROJAS-SOLÓRZANO, L. Design Optimization of an Oil-Air Catch Can Separation System. **Journal of Transportation Technologies**, Outubro 2015. 247-262.

ÇENGEL, Y.; BOLES, M. **Termodinâmica**. 7<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: AMGH Editora Ltda., 2017.

DAMJANOVIC, D. et al. **CFD analysis of concept car in order to improve aerodynamics**. Mechanical Engineering Faculty in Slavonski Brod. Slavonski Brod. 2010.

EYMARD, R.; GALLOUET, T.; HERBIN, R. **Finite Volume Methods**. [S.l.]: [s.n.], v. II, 2000.

FORTUNA, A. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**. [S.l.]: Editora da Universidade de São Paulo, 2000.

GAGNON, L.; RICHARD, M. **Parallel CFD of a prototype car with OpenFOAM**. 5th OpenFOAM Workshop. Gothenburg: [s.n.]. 2010.

GUERRERO, A.; CASTILLA, R. Aerodynamic Study of the Wake Effects on a Formula 1 Car, 5 Outubro 2020.

HOLZMANN, T. **Mathematics, Numerics, Derivations and OpenFOAM®**. [S.l.]: [s.n.], 2016.

JATHAR, L.; BORSE, S. Study of Flow over Car by Changing Different Parameters using Open Foam. **International Journal of Fluids Engineering**, 2014. 29-38.

KÖRPE, D.; KANAT, Ö.; OKTAY, T. The Effects of Initial  $y$  plus: Numerical Analysis of 3D NACA 4412 Wing Using  $y$ -Re\_theta SST Turbulence Model. **European Journal of Science and Technology**, Kastamonu, Dezembro 2019. 692-702.

NEBENFUHR, B. **OpenFOAM: A tool for predicting automotive relevant flow fields**. Chalmers University of Technology. Goteborg. 2010.

NOR ELYANA, A.; ESSAM, A.-S.; ADRIAN, G. Mesh Optimization for Ground Vehicle Aerodynamics. **CFD Letters**, Março 2010.

NORTON, T.; SUN, D.-W. Computational fluid dynamics (CFD) - an effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. **Food Science & Technology**, Dublin, 2006. 600-620.

NUNES, L.; FREIRE, E.; ANSONI, J. Computational simulation of an aerodynamic profile of a vehicle SAE formula type using OpenFOAM. **Semina: Ciências Exatas e Tecnologia**, Londrina, Janeiro 2022. 3-10.

OPENCFD LTD. OpenFOAM: User Guide v2112. **openfoam.com**, 2018. Disponível em: <<https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/doc/guide-applications-solvers-incompressible-simpleFoam.html>>. Acesso em: 20 Julho 2022.

OTHMER, C. Adjoint methods for car aerodynamics. **Journal of Mathematics in Industry**, Wolfsburg, 2014.

OXYZOGLU, I. **Design & Development of an Aerodynamic Package for a FSAE Race Car**. University of Thessaly. Volos. 2017.

PEHAN, S.; KEGL, B. **Aerodynamics Aspects of Formula S Racing Car**. International Design Conference. Dubrovnik. 2002.

PORCAR, L.; TOET, W.; GAMEZ-MONTERO, P. J. Study of the Effect of Vertical Airfoil Endplates on Diffusers in Vehicle Aerodynamics. **Designs**, Julho 2021.

ROACHE, P. Verification of codes and calculations. **AIAA Journal**, Reston, 1999. 696-702.

SALIM, S.; CHEAH, S. **Wall  $y^+$  Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows**. International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, IMECS 2009. Hong Kong: [s.n.]. 2009.

SHINDE, G.; JOSHI, A.; NIKAM, K. **Numerical Investigations of the DrivAer Car Model using Opensource CFD Solver OpenFOAM.** [S.l.]: [s.n.], 2013.

SIMPSON, R.; AHMED, N.; ARCHER, R. Improvement of a Wing's Aerodynamic Efficiency Using Coanda Tip Jets. **Journal of Aircraft**, Julho 1999. 183-184.

SIMSCALE. What is  $y^+$  (yplus)? **simscale.com**, 2020. Disponível em: <<https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394/3>>. Acesso em: 29 Agosto 2022.

SOARES, J. **Variação da Distribuição de Pressão em um Aerofólio devido ao Efeito Coanda.** Universidade de São Paulo. São Carlos. 2001.

WILCOX, D. **Turbulence Modeling for CFD.** 3<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: [s.n.], 2006.