

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

CHRISTIAN ROBERTO TONET

**ESTUDO FLUIDODINÂMICO COMPUTACIONAL APLICADO A UM PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA PARA COMPETIÇÕES NA SHELL ECO-MARATHON**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2019

CHRISTIAN ROBERTO TONET

**ESTUDO FLUIDODINÂMICO COMPUTACIONAL APLICADO A UM
PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA COMPETIÇÕES NA
SHELL ECO-MARATHON**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto

PATO BRANCO

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Estudo Fluidodinâmico Computacional Aplicado a um Protótipo de Eficiência Energética para Competições na Shell Eco-marathon

Christian Roberto Tonet

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 26/06/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Francisco Augusto Aparecido Gomes
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. MsC. Marcio Tadayuki Nakaura
(UTFPR – Departamento de Mecânica)

Prof. Dr. Diego Rizzotto Rossetto
(UTFPR – Departamento de Mecânica)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

RESUMO

TONET, Christian Roberto. **Estudo Fluidodinâmico Computacional Aplicado a um Protótipo de Eficiência Energética para Competições na Shell Eco-marathon**. 2019. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco. 2019.

Este estudo aborda a questão relacionada a aerodinâmica veicular, buscando as principais referências, com o objetivo de traçar a relação entre consumo de combustível e aerodinâmica, uma vez que, o arrasto surge como uma força opositora do movimento. Devido ao grande interesse da população por meios automotivos que poluam menos o meio ambiente, as empresas do setor pesquisam ferramentas que antecipem maior eficiência, tanto no sentido social quanto econômico. Para tanto, visa os eventos da Shell Eco-marathon, baseando-se no crescimento da Equipe de Eficiência Energética Pato a Jato, em virtude do grande número de estudantes de diversos países participando. Apresentando pesquisa bibliográfica sobre o tema e, por fim, as considerações finais, que incluem principais elementos abordados, limitações da pesquisa, e sugestões para trabalhos futuros.

Palavras chave: Eficiência Energética; Aerodinâmica Veicular; Arrasto.

ABSTRACT

TONET, Christian Roberto. **Fluid Dynamics Study Applied to a Energy Efficiency Prototype for Shell Eco-marathon Competitions**. 2019. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco. 2019.

This study deals with the issue related to vehicular aerodynamics, searching for the main references, in order to draw the relationship between fuel consumption and aerodynamics, since drag appears as an opposing force of the movement. Due to the great interest of the population for automotive means that pollute less the environment, the companies of the sector research tools that anticipate greater efficiency, both socially and economically way. To do so, it targets the Shell Eco Marathon events, based on the growth of the Pato a Jato Energy Efficiency Team, due to the large number of students from different countries participating. Presenting bibliographic research on the subject and, finally, the final considerations, which include the main elements covered, limitations of the research, and suggestions for future work.

Keywords: Energy efficiency; vehicular aerodynamics; drag.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Protótipo da Equipe Pato a Jato na competição da Shell Eco-marathon	14
Figura 2 - Protótipo movido a etanol da Equipe Pato a Jato	16
Figura 3 - Esquema teórico do efeito Venturi e efeito solo	18
Figura 4 - O tubo de Venturi	21
Figura 5 – Distribuição da pressão e da tensão de cisalhamento	24
Figura 6 - Exemplo de simulação do método CFD	26
Figura 7 - Exemplos de malha triangular e malha quadrilateral, respectivamente	27
Figura 8 - Domínio Original	29
Figura 9 - Sustentação, arrasto e momento de lançamento de um corpo com diferentes valores de espaços livre com esteira em movimento e parada.	34
Figura 10 - Dimensões do corpo de Ahmed	37
Figura 11 - Corpo de Ahmed dentro do domínio de solução computacional	38
Figura 12 - Malha gerada no corpo de Ahmed	38
Figura 13 - Comparação entre coeficientes de arrasto teóricos	40
Figura 14 - Linhas de corrente para o corpo de Ahmed através do software ANSYS	41
Figura 15 - Linhas de corrente para o corpo de Ahmed	41
Figura 16 - Modelos de protótipos	43
Figura 17 - Variação da altura do protótipo com relação ao solo para o modelo 1.....	43
Figura 18 - Variação da altura do protótipo com relação ao solo para o modelo 2.....	45
Figura 19 - Volume de controle para os modelos 1 e 2.....	47
Figura 20 - Camadas de <i>inflation</i> geradas na região do protótipo.....	48
Figura 21 - Contornos de velocidade para altura de 50 mm do modelo 1	51
Figura 22 - Contornos de velocidade para altura de 150 mm do modelo 1	51
Figura 23 – Coeficientes de arrasto para os modelos 1 e 2	53
Figura 24 – Coeficientes de sustentação para os modelos 1 e 2.....	53
Figura 25 - Contornos de pressão para altura de 50 mm do modelo 2	55
Figura 26 - Contornos de pressão para altura de 150 mm do modelo 2	55

Figura 27 – Modelo 1 (a) e modelo 2 (b) sem caixas de roda e pneus	56
Figura 28 - Contorno de pressão para o modelo 1 sem rodas com altura de 50mm em relação ao solo	58
Figura 29 - Contorno de pressão para o modelo 1 sem rodas com altura de 150mm em relação ao solo	58
Figura 30 – Coeficientes de arrasto para os modelos 1 e 2 sem rodas	60
Figura 31 – Coeficientes de sustentação para os modelos 1 e 2 sem rodas ...	61
Figura 32 - Contorno de velocidade para o modelo 2 sem rodas com altura de 50mm em relação ao solo	62
Figura 33 - Contorno de velocidade para o modelo 2 sem rodas com altura de 150mm em relação ao solo	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados para simulação do corpo de Ahmed	39
Tabela 2 - Dimensões do volume de controle e protótipo para o modelo 1	46
Tabela 3 - Dimensões do volume de controle e protótipo para o modelo 2	46
Tabela 4 - Condições de contorno no domínio do fluido	47
Tabela 5 - Dados de malha e setup para o modelo 1.....	49
Tabela 6 - Forças e áreas para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação para o modelo 1	50
Tabela 7 - Dados de malha e setup para o modelo 2.....	52
Tabela 8 - Forças e áreas para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação para o modelo 2	52
Tabela 9 - Dados de malha e setup para o modelo 1 sem rodas	57
Tabela 10 - Forças e áreas para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação para o modelo 1 sem rodas	57
Tabela 11 - Dados de malha e setup para o modelo 2 sem rodas	59
Tabela 12 - Forças e áreas para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação para o modelo 2 sem rodas	60
Tabela 13 - Relação entre coeficientes de sustentação e arrasto para os modelos 1 e 2 com rodas	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Motivação	11
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo Principal	11
1.2.2 Objetivos Específicos	11
1.3 Justificativa	12
1.4 Estrutura do Trabalho	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Shell Eco-marathon	14
2.2 Equipe de Eficiência Energética Pato a Jato	15
2.3 História dos veículos e sua relação com a aerodinâmica	16
2.4 Efeito Venturi e Equação de Bernoulli	18
2.5 Número de Reynolds	21
2.5.1 Turbulência	22
2.5.2 Equação da continuidade e equações de Navier-Stokes	22
2.5.3 Coeficientes de arrasto e sustentação	23
2.6 Análise Fluidodinâmica Computacional (CFD)	25
2.6.1 Método de volumes finitos	28
2.6.2 Modelos de turbulência para análise de escoamentos	29
2.6.2.1 Modelos K-EPSILON ($k-\epsilon$)	30
2.6.2.2 Modelo SPALART-ALLMARAS	30
2.6.2.3 Modelos K-ÔMEGA ($k-\omega$)	31
2.6.2.3.1 Standard $k-\omega$	32
2.6.2.3.2 SST $k-\omega$	32
2.7 Efeito Solo	33
3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS	37
4 PROTÓTIPOS PADRÃO SHELL ECO-MARATHON	42
4.1 Modificação da altura com relação ao solo	43
5 RESULTADOS PARA OS PROTÓTIPOS PADRÃO SHELL ECO- MARATHON	46
5.1 Simulações para o modelo 1	48
5.2 Simulações para o modelo 2	52

5.3 Modelos dos protótipos sem rodas.....	56
5.3.1 Modelo 1 sem rodas.....	56
5.3.2 Modelo 2 sem rodas.....	59
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
7 CONCLUSÃO.....	66
REFERÊNCIAS.....	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O que se observa é que antes de tomar qualquer atitude que vise alta eficiência energética, torna-se essencial identificar as competências necessárias para ganhar e manter vantagem competitiva no mercado, atendendo às diferentes demandas. Tal tarefa pode ser considerada um tanto árdua, considerando que a capacidade de inovação e a gestão de conhecimentos são habilidades relevantes no cenário competitivo que vem se desenvolvendo atualmente.

Diante desse cenário, pretende-se responder a indagações, como: qual a melhor geometria para um protótipo com relação a influência do arrasto. Analisando os parâmetros necessários para uma simulação fluidodinâmica computacional, com a finalidade de questionar e refletir sobre quais as atribuições necessárias, e quais os desafios, para gerar maior autonomia visando o crescimento da Equipe de Eficiência Energética Pato a Jato.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

Analisar qualitativamente a influência das forças aerodinâmicas em um protótipo de eficiência energética por meio de simulações fluidodinâmicas computacionais, visando soluções para o aumento da eficiência aerodinâmica.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Modelar protótipos utilizando as regras da Shell Eco-marathon 2019;
- Analisar os parâmetros necessários para uma simulação fluidodinâmica computacional correta;

- Comparar a influência do arrasto e da sustentação para diferentes geometrias do protótipo.

1.3 Justificativa

Esse tema justifica-se pela sua importância na atualidade, devido ao crescimento do mercado mundial de automóveis, para as empresas que buscam modernizar para conseguir uma maior vantagem competitiva. Passa a ser fundamental gerar redução no consumo de combustíveis, uma vez que, o impacto ambiental que estas empresas geram contribuíram para o início de difusão sobre o conceito de eficiência energética e o estudo sobre novas ferramentas computacionais para previsão do gasto energético associado aos veículos.

As indústrias que buscam soluções inovadoras ao que tange a eficiência energética, são impulsionadas por *softwares* de simulação computacional, onde um dos principais desafios é otimizar o desempenho dos componentes do sistema. "Um dos fatores que apresentam impacto significativo sobre a eficiência energética de um produto ou equipamento é a aerodinâmica, que ao reduzir a força de arrasto pode impactar expressivamente nos gastos de combustíveis e demais recursos energéticos." (ESSS¹, 2018)

1.4 Estrutura do Trabalho

Dentro do contexto atual, este trabalho tendo como tema: Estudo Fluidodinâmico Computacional aplicado à um protótipo de eficiência energética para competições na Shell Eco-marathon, utilizando pesquisa bibliográfica e documental sobre a literatura existente sobre o assunto, bem como, os conhecimentos adquiridos durante os anos de estudo e participação na Equipe Pato a Jato. O presente trabalho está organizado conforme os assuntos a seguir: Shell Eco Marathon; Equipe de eficiência energética Pato a Jato; História dos veículos e sua relação com a aerodinâmica; Efeito Venturi e Equação de Bernoulli; Número de Reynolds; Turbulência; Equação da continuidade e

¹ <https://www.esss.co/ansys/eficiencia-energetica/>

Equações de Navier Stokes; Coeficientes de Arrasto e Sustentação; Análise Fluidodinâmica Computacional (CFD); Método de volumes finitos; Modelos de Turbulência para análise de escoamentos e Efeito solo.

Após estudos realizados sobre o referencial teórico, acima citado, apresentar-se-á a validação, onde realizou-se estudo sobre o *software* ANSYS, modelo padrão conhecido na literatura para comprovar a repetibilidade física dos resultados obtidos na utilização do programa. Bem como, a apresentação de 2 modelos distintos, com variação na altura do protótipo com relação ao solo. Sendo, 2 protótipos com 5 variações de altura cada um, contabilizando 10 modelos.

Concluindo, estão apresentados os resultados e discussões e a referências bibliográficas utilizadas para a realização desse Trabalho de Conclusão de Curso.

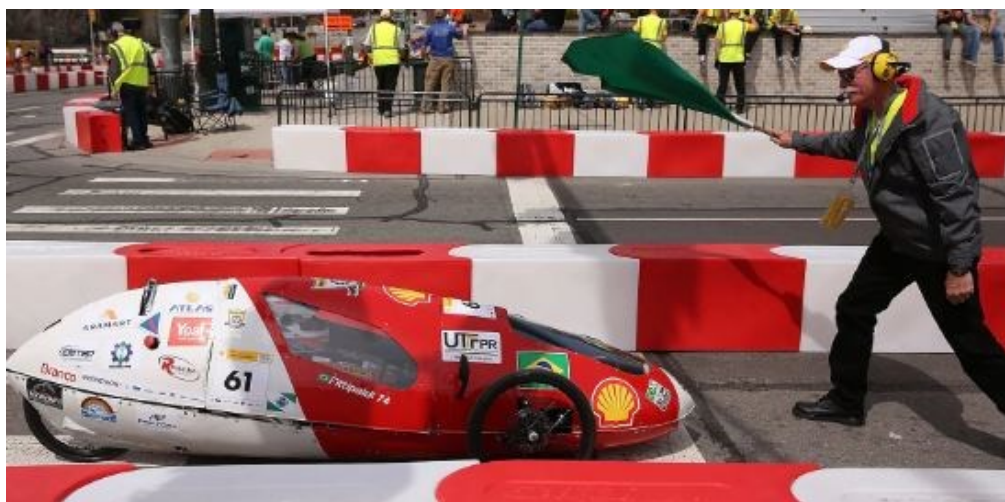
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Shell Eco-marathon

Em 1939, surgiu a competição da Shell Eco-marathon, inicialmente começou como uma brincadeira entre os funcionários Shell Oil Company nos Estados Unidos em que eles apostavam amigavelmente sobre quem poderia viajar mais longe com a mesma quantidade de combustível. A competição na forma como é conhecida hoje, iniciou-se em 1985 na França. Desde então o evento cresceu e tornou-se global, atualmente a disputa conta com três eventos gerais, sendo eles: Asia, Americas e Europa, além de etapas desafio, sendo uma delas no Brasil. (SHELL, 2015)

A competição conta com certas regras em relação as dimensões do protótipo, distância entre eixos, raio de giro, entre outros. Essas regras serão levadas em consideração para o projeto do protótipo antes de serem realizadas as análises aerodinâmicas.

Figura 1 - Protótipo da Equipe Pato a Jato na competição da Shell Eco-marathon



Fonte: Shell (2015)

2.2 Equipe de Eficiência Energética Pato a Jato

A Equipe de Eficiência Energética Pato a Jato é formada por acadêmicos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco. Foi fundada em 2009, sob a coordenação do professor Doutor Genaro Marcial Mamami Gilapa, e a orientação do professor Mestre Marcio Tadayuki Nakaura. A equipe tem como propósito o estudo, projeto e construção de veículos de eficiência energética, que visam percorrer a maior distância com o menor consumo de combustível possível, ou seja, visam a maior autonomia. Além disso, o projeto promove a pesquisa e inovação na busca por uma maior eficiência energética, apresentando desafios aos acadêmicos, que devem utilizar de seus conhecimentos teóricos e práticos para o desenvolvimento do projeto.

De acordo com dados constantes no site² da UTFPR, Pato a Jato, a equipe foi criada, inicialmente, com o intuito de participar da Maratona Nacional de Eficiência Energética. Começou a competir em 2010, tendo os primeiros resultados expressivos, conquistados três anos depois, em 2013, com a terceira colocação na categoria etanol. Já em 2014, obteve vice-campeonato nas categorias gasolina e etanol. Com isso, foi convidada a participar da Shell Eco-marathon Americas, em 2015, disputada em Detroit nos Estados Unidos, onde participaram universidades de vários países das Américas. A equipe Pato a Jato sagrou-se vice-campeã das Américas na categoria de combustíveis alternativos usando etanol, obtendo o melhor resultado de uma equipe brasileira na história da competição.

Em 2016, a equipe voltou a participar da Eco-marathon Américas, mas a equipe não conseguiu concluir o trajeto e, por isso, não teve uma média computada. Já no ano de 2017, a Pato a Jato participou da Shell Eco-marathon Brasil e sagrou-se campeã na categoria etanol e segundo lugar na categoria gasolina. No ano de 2018, a equipe voltou para os Estados Unidos para participar da Shell Eco-marathon Americas, conseguindo o melhor resultado das Américas com 523 km/L de combustível etanol.

Os membros da Equipe Pato a Jato são responsáveis por todo o desenvolvimento do projeto, relacionando os conhecimentos obtidos em sala de

² FONTE: <http://www.pb.utfpr.edu.br/patoajato/> (acesso: 08/06/2019 – 08h52)

aula, com atividades práticas para construção e fabricação de partes, peças e instrumentos para os protótipos, visando sempre o aprimoramento do projeto. Como se vê na Figura 2, o atual protótipo da equipe durante a participação em uma etapa da competição da Shell Eco-marathon, apresentada abaixo:

Figura 2 - Protótipo movido a etanol da Equipe Pato a Jato



Fonte: <http://www.pb.utfpr.edu.br/patoajato/> (acesso: 08/06/2019)

2.3 História dos veículos e sua relação com a aerodinâmica

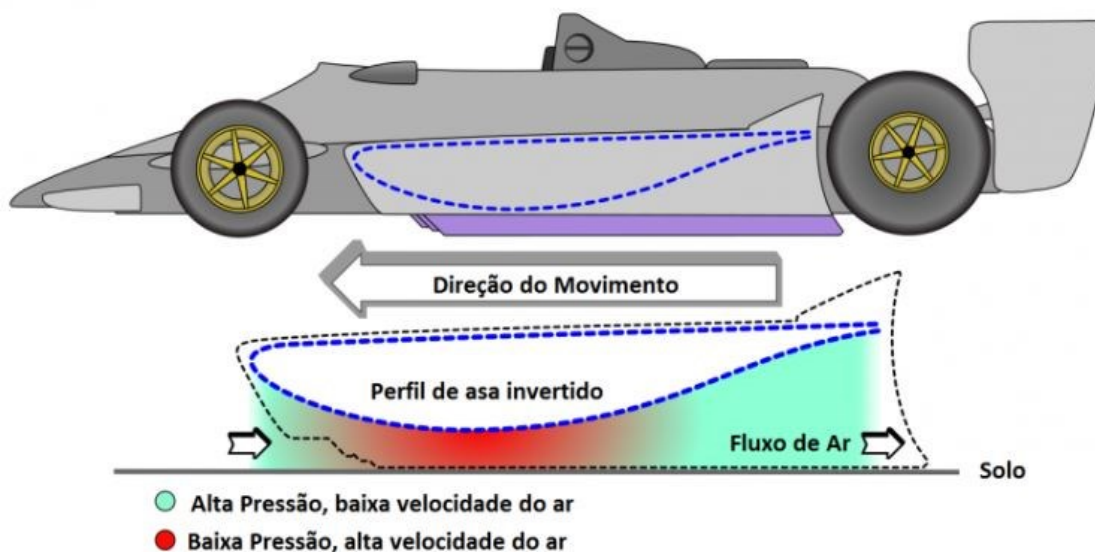
Desde o início da história do automóvel, por volta de 1769, com a criação do motor a vapor de automóveis, capazes de transportar humanos, (ECKERMANN, 2001), os fabricantes concentram-se na aerodinâmica de seus modelos. Quando se busca entender as forças que os fluidos exercem sobre os corpos que neles estão imersos, chega-se ao ramo de estudos conhecido como aerodinâmica, tais como, a força de sustentação e de arrasto, interferindo tanto em corpos estáticos quanto em corpos em movimento. O desenvolvimento aerodinâmico tem uma grande influência no projeto do veículo, pois tem relação com o consumo, desempenho e estabilidade.

Na dinâmica dos fluidos, arrasto é a força que faz resistência ao movimento de um objeto sólido por meio de um fluido (líquido ou gás) caracterizado por forças de fricção que agem tangencialmente à superfície do objeto e de forças de pressão que atuam em uma direção perpendicular à superfície do objeto. (FRENCH, 1970)

Outra força a se considerar durante o movimento do veículo é a sustentação, uma força gerada devido à diferença de pressão entre as partes superior e inferior do veículo. Para esses, o interessante é obter uma sustentação negativa, chamada de *downforce*. Isso indica que a velocidade do fluxo de ar na parte inferior do carro deve ser maior que na parte superior, diminuindo a pressão e fazendo com que o veículo fique fixo ao chão ao invés de suspender, como acontece com os aviões. (SOUSA e GONÇALVES, 2013, p. 10).

O efeito solo tornou-se popular no mundo automobilístico por meio da Lotus 78/79. Colin Chapman, *designer* e fundador da equipe Lotus de Fórmula 1, introduziu saias laterais na parte inferior do carro, as quais faziam com que o ar fosse enclausurado entre o carro e o solo. Colin criou seu projeto com base no Princípio de Bernoulli e do efeito Venturi, que demonstram que um fluido em movimento, após passar por uma zona de estreitamento, aumenta sua velocidade e diminui sua pressão. Isso fez com que sua Lotus tivesse um alto valor de *downforce*, podendo atingir altas velocidades em curvas e mesmo assim mantendo-se fixa ao solo. Além disso, a Lotus 78/79 possuía seu assoalho em formato de asa invertida, de forma a criar um Venturi. A parte inferior do carro interagia com o solo e gerava um valor considerável de *downforce*, devido a aceleração do ar e queda da pressão em baixo do modelo, evidenciando o efeito solo.

Figura 3 - Esquema teórico do efeito Venturi e efeito solo



Fonte: BELLI (2019) Site: <https://www.autoentusiastas.com.br/2019/03/f-1-sem-asa-dianteira/>
(Acesso em: 10/06/19)

De acordo com Soares (2013), o desenvolvimento cuidadoso a partir do princípio por Colin Chapman, tornou os carros da Lotus imbatíveis, durante a temporada, vencendo nove das quinze corridas e, assim, o conquistando o campeonato como piloto e construtor, no ano de 1978. Porém, tempos depois, novo regulamento da categoria acabou por “banir” o Efeito Solo, impondo que o assoalho deve possuir um degrau planar. Tal medidas foram justificadas por razão dos níveis de *downforce* gerado, permitiam velocidades, em curvas, muito altas para o nível de segurança que os carros poderiam oferecer na época.

2.4 Efeito Venturi e Equação de Bernoulli

No efeito Venturi (também conhecido como tubo Venturi), quando num sistema fechado, o fluido em movimento constante dentro de um duto uniforme comprime-se, momentaneamente, ao encontrar uma zona de estreitamento diminuindo sua pressão e, conseqüentemente, aumentando sua velocidade ao atravessar a zona estreitada. (NUSSENZVEIG, H. MOYSÉS, 1996).

Venturi apud Kent (1912, p. 5) ao apresentar o resultado de suas pesquisas em 1797, apontou que: “[...] fluidos incompressíveis sobre pressão,

ao passarem sobre um tubo convergente ganham velocidade e vice versa, para tubos divergentes”.

A Equação de Bernoulli, ou Princípio de Bernoulli, foi apresentada na obra *Hydrodynamica* (1738) pelo matemático suíço Daniel Bernoulli³. A equação representa uma aplicação do princípio de conservação de energia para fluidos ideais, que nos possibilita relacionar a velocidade do fluido com a pressão no mesmo.

Segundo Fox (2011), a equação de Euler para escoamento em regime permanente ao longo de uma linha de corrente, é dada por:

$$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = v \frac{\partial v}{\partial s} \quad (1)$$

Dessa forma, se um fluido desloca-se uma distância, ds , através de uma linha de corrente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial s} ds &= dp && \text{(variação de pressão ao longo de } s) \\ \frac{\partial z}{\partial s} ds &= dz && \text{(variação de elevação ao longo de } s) \\ \frac{\partial v}{\partial s} ds &= dv && \text{(variação de velocidade ao longo de } s) \end{aligned}$$

Assim, após multiplicar a Equação (1) por ds , obtemos:

$$-\frac{dp}{\rho} - g dz = v dv \text{ ou } \frac{dp}{\rho} + v dv + g dz = 0 \text{ (ao longo de } s)$$

Integrando esta equação:

$$\int \frac{dp}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g z = \text{constante (ao longo de } s)$$

Para o caso especial de $\rho = \text{constante}$, ou seja, escoamento incompressível, a equação (2), torna-se a equação de Bernoulli:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g z = \text{constante} \quad (2)$$

³ FONTE: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v41n3/1806-9126-RBEF-41-3-e20180333.pdf>

Onde,

p = pressão exercida pelo fluido (Pa)

ρ = densidade do fluido (kg/m^3)

V = velocidade do escoamento (m/s)

g = gravidade (m/s^2)

z = elevação (m)

A equação (2) apresenta as seguintes restrições:

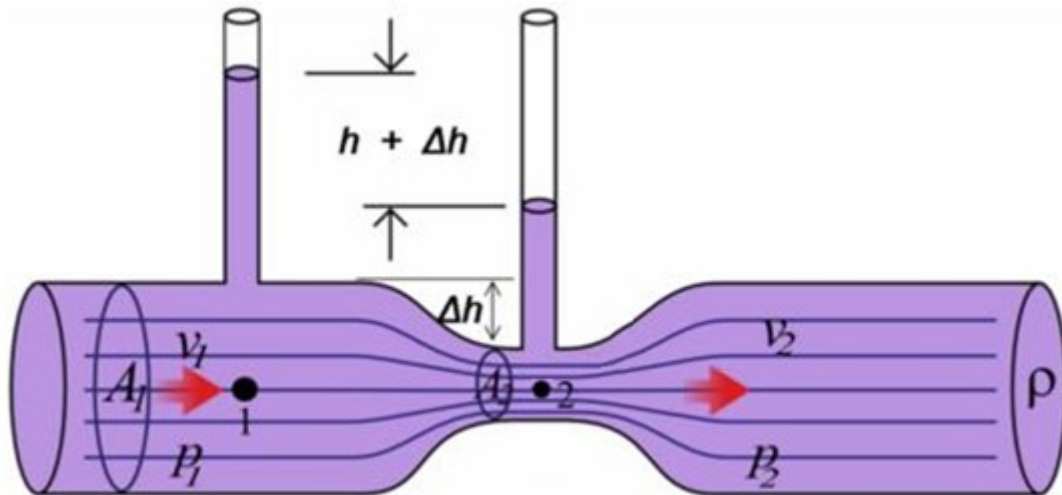
- (1) Escoamento em regime permanente.
- (2) Escoamento incompressível.
- (3) Escoamento sem atrito.
- (4) Escoamento ao longo de uma linha de corrente.

Aplicando a equação (3) para duas regiões distintas de um tubo, por onde escoar um fluido, teremos:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (3)$$

Inspirado na equação de Bernoulli, o físico italiano Giovanni Battista Venturi criou o tubo de Venturi, um aparato utilizado para obter a velocidade do escoamento de um fluido incompressível. No tubo o fluido atravessa uma região com maior seção transversal e em seguida outra região de menor seção transversal. A partir da diferença de pressão entre as duas regiões, aferida por meio do deslocamento de colunas do líquido, é possível obter as velocidades do líquido nas regiões. Um exemplo de tubo de Venturi pode ser visto na Figura 4, a seguir.

Figura 4 - O tubo de Venturi



Fonte: adaptado de CID; CORREA (2019) Site: <http://www.scielo.br/pdf/rbef/v41n3/1806-9126-RBEF-41-3-e20180333.pdf> (Acesso em: 10/06/19)

2.5 Número de Reynolds

O número de Reynolds é, de acordo com Such (2018, p.16), um parâmetro adimensional que estabelece as características do escoamento. Os valores baixos referem-se a pouca viscosidade e efeitos de inércia desprezíveis; os valores médios indicam um leve escoamento laminar; Valores altos relacionam-se com escoamentos turbulentos. O número de Reynolds é determinado pela equação (4):

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (4)$$

Onde, ρ é a densidade do fluido, v é a velocidade característica do escoamento, L é referente ao comprimento do corpo e μ é a viscosidade dinâmica do fluido, cujo parâmetro influencia na resistência ao movimento. (SUCH, 2018, p.16)

2.5.1 Turbulência

Em 1883, Osborne Reynolds examinou diferentes regimes de escoamento ao introduzir corante no escoamento de água em um duto circular. Começando com o escoamento laminar, onde as camadas de fluidos movem-se umas sobre as outras como lâminas e, à medida que aumentava a velocidade do escoamento, instabilizava a forma de oscilações até o corante se misturar com a água, em função da presença de flutuações de velocidade transversalmente à direção principal do escoamento. O movimento que origina a mistura é chamado turbulência e é responsável pela transferência de massa e de quantidade de movimento na direção transversal do escoamento. Desta forma, a turbulência faz com que o perfil de velocidade no escoamento turbulento em canais ou na camada limite seja mais uniforme que o escoamento laminar. (MÖLLER S.V.,2004, apud ABRAMCHUK, 2014, p. 48)

Tratando-se de aerodinâmica, na maioria dos casos o escoamento é turbulento, onde os números de Reynolds são elevados e o escoamento laminar torna-se instável. Em relação à dinâmica dos fluidos computacional, a complexidade do escoamento interfere no custo computacional (LJUNGSTRÖM; OTTOSSON; SAEED, 2016, apud SUCH, 2018, p. 17).

2.5.2 Equação da continuidade e equações de Navier-Stokes

Segundo Bosch (2016, p. 19), para a discretização da malha do sistema em um número finito de elementos, concebe-se as leis básicas do escoamento fluidodinâmico na forma diferencial, sendo as equações que regem o problema conhecidas como equações de Navier-Stokes e equação da continuidade.

Fox (2011) descreve que o fluido é incompressível e a densidade constante. Baseando-se nisso, a equação (5) é a equação da continuidade (conservação de massa) e as equações (6), (7) e (8), são as equações de Navier-Stokes (quantidade de movimento), expressas em coordenadas cartesianas.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (8)$$

As aplicações da dinâmica dos fluidos computacional estão voltadas ao estudo e resultado das Equações de Navier-Stokes em desafios mais complexos, isto é, problemas do mundo real (FOX et al. 2010, apud SUCH, 2018, p. 18).

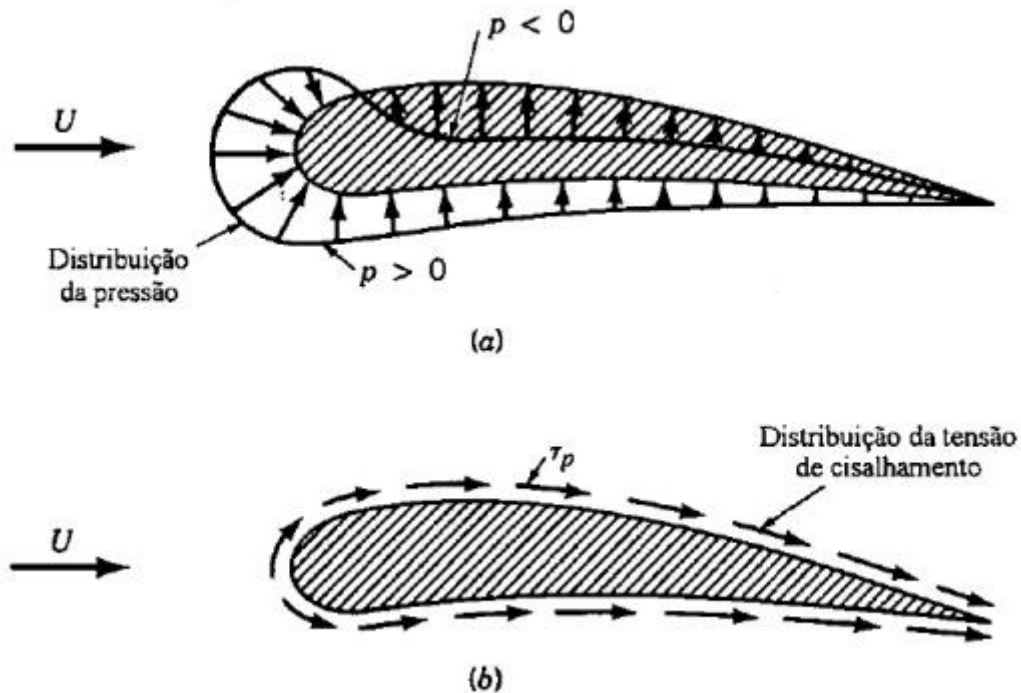
2.5.3 Coeficientes de arrasto e sustentação

Conforme White (2011, apud SUCH, 2018, p.19), qualquer corpo submetido a um escoamento de ar suportará forças e momentos. Além disso, cita o arrasto como a força exercida sobre o veículo paralela ao escoamento de ar. Existe também, a força de sustentação que é uma força perpendicular ao arrasto atuando no corpo e suportando o peso do veículo. A equação (9) descreve essas forças, sendo C_D o coeficiente de arrasto, C_L o coeficiente de sustentação, F_D a força de arrasto, F_L a força de sustentação, ρ a densidade, v a velocidade, A_p a área frontal e A_s a área superior.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_p} \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_s} \quad (9)$$

A soma do arrasto de atrito e de pressão resultam na força de arrasto total, que pode ser descrita em função da tensão de cisalhamento, provocada pelos efeitos viscosos e pela tensão normal, a qual é referente à pressão (MUNSON et al., 2004, apud ABRAMCHUK, 2014, P.19). A Figura 5 representa a distribuição da pressão e da tensão de cisalhamento.

Figura 5 – Distribuição da pressão e da tensão de cisalhamento



Fonte: MUNSON et al. (2004)

O coeficiente de pressão C_P é um parâmetro também empregado na comparação aerodinâmica entre diferentes corpos. Além disso, é definido como a diferença de pressão estática local, P , e a pressão no escoamento, P_F . Determinado pela equação (10):

$$C_P = \frac{P - P_F}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (10)$$

O coeficiente de pressão é contrário ao arrasto e a sustentação. Ademais, o coeficiente de pressão é um parâmetro local em diferentes pontos ao longo da superfície e não um valor único para todo corpo (WHITE, 2011, apud SUCH, 2018, p.19).

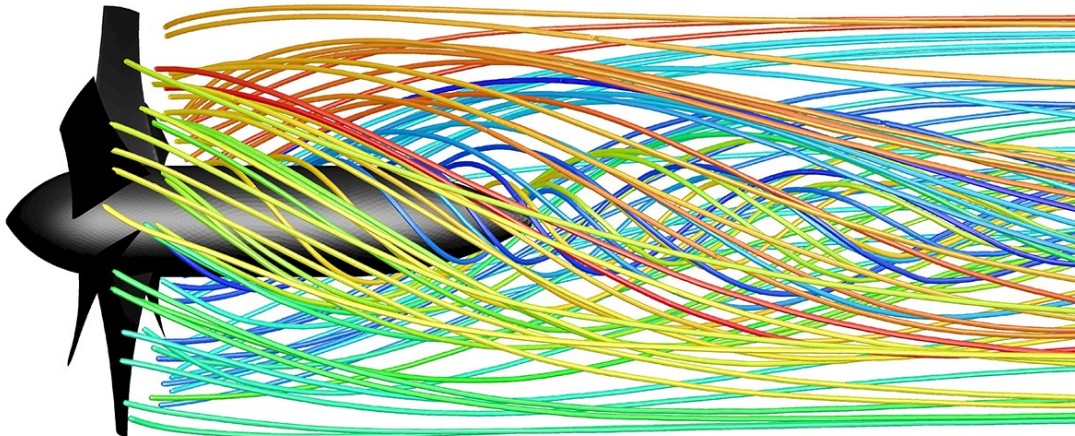
2.6 Análise Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A fluidodinâmica computacional, conforme Kessler (2016), refere-se a uma área de estudo da Mecânica dos Fluidos que analisa itens como escoamento de fluidos, transferência de calor e demais fenômenos relacionados. É conhecida como CFD (*Computation Fluid Dynamics*) e realizada por meio de simulações numéricas computacionais.

Em meados da década de 1960, o método da fluidodinâmica computacional foi integrado no *design*, na pesquisa e no desenvolvimento da indústria aeroespacial, e na fabricação de aeronaves e turbinas. Conforme os recursos tecnológicos computacionais foram se aprimorando e se desenvolvendo, o CFD foi sendo utilizado no *design* de motores de combustão interna, nas câmaras de combustão de turbinas a gás, nas caldeiras e para calcular forças aerodinâmicas geradas na superfície externa dos carros. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

O método da fluidodinâmica computacional funciona como uma opção nas simulações em túneis de vento, uma vez que as alterações no projeto são facilmente realizadas durante o processo sem obrigação de fabricação de protótipos com diferentes geometrias. Além do mais, a CFD denota grande nível de detalhamento nos resultados, mantendo-se a precisão de túneis de vento. Como se verifica na Figura 6.

Figura 6 - Exemplo de simulação do método CFD



Fonte: Ansys, Inc. (2018)

Para Versteeg e Malalasekera (1995), um código de fluidodinâmica computacional na maioria dos casos possui três etapas principais: pré-processamento, resolução (*solver*) e pós-processamento. Cada etapa é brevemente descrita a seguir:

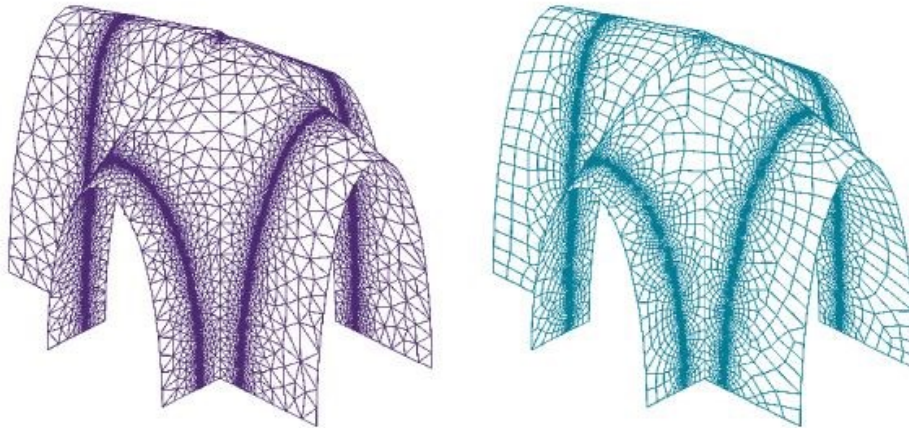
Pré-processamento: estabelece-se na entrada de um problema por meio de uma interface no programa de fluidodinâmica computacional e a mudança desta entrada para uma configuração adequada para o uso na resolução. Compreendem-se nas atividades do pré-processamento:

- Definição da geometria de interesse: o domínio.
- A geração de uma malha: subdivisão do domínio em um número de subdomínios menores.
- Definição das propriedades do fluido.
- Especificação das condições de contorno.

A solução para um problema de escoamento (velocidade, pressão, temperatura, etc.) é definida pelo usuário dentro de cada volume de controle. A precisão de um resultado dado pelo CFD é ditada com relação a malha empregada no problema. Em geral, quanto maior seu número, melhor é a precisão da solução. Porém, malhas com maior precisão tendem a elevar o custo computacional e o tempo de cálculo do problema. Boas malhas são regularmente não uniformes: são mais refinadas em áreas onde ocorrem grandes variações

de ponto a ponto e é mais grosseira em regiões com menor mudança. Logo, deve-se levar em consideração nos projetos a precisão da malha e seu custo computacional empregado. Como se observa na Figura 7.

Figura 7 - Exemplos de malha triangular e malha quadrilateral, respectivamente



Fonte: DANIEL S. H. LO (2015)

Solver: Tem-se três métodos distintos de soluções numéricas: diferenças finitas, elementos finitos ou volumes finitos. Estes algoritmos numéricos consistem nos seguintes passos:

- Aproximação de variáveis de fluxo desconhecidas por meio de funções simples.
- Discretização por substituição das aproximações nas equações de fluxo governantes e manipulações matemáticas subsequentes.
- Solução das equações algébricas.

A principal técnica de solução numérica empregada no CFD é o método dos volumes finitos, além de ser o método empregado pelo Ansys, que é o CFD utilizado neste trabalho. Este método será melhor explicado futuramente.

Pós-processamento: É quando os resultados do problema são apresentados ao usuário. Com a evolução dos programas CFD, juntamente com o aumento do poder computacional e capacidade gráfica dos computadores, surgiram ferramentas versáteis que facilitam a análise e entendimento dos resultados, como por exemplo:

- Gráficos vetoriais.
- Gráficos de contorno.

- Gráficos de superfície.
- Rastreamento de partícula.
- Saída em cores dos dados.
- Animações para resultados dinâmicos.

2.6.1 Método de volumes finitos

Os métodos de discretização mais difundidos são o método dos elementos finitos, o método das diferenças finitas e o método dos volumes finitos, sendo este último o mais utilizado em CFD. Shaw (1992), comenta sobre as três técnicas utilizadas para solucionar as equações governantes do escoamento de um fluido:

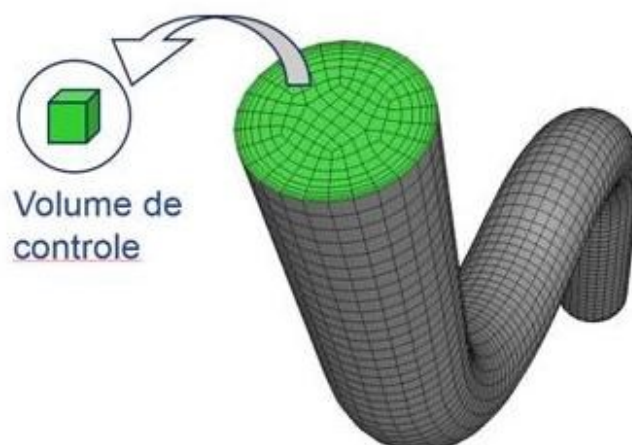
O Método dos Elementos Finitos, caracterizado como hábil no tratamento de geometrias, mas sem ferramentas para tratar os termos advectivos, presentes nas equações do movimento, é direcionado para área estrutural na solução de problemas de elasticidade.

O Método das Diferenças Finitas, é empregado na área de mecânica dos fluidos, porém considerado limitado nos quesitos de geometrias complexas, possui termos com não-linearidades, por envolverem as equações de Navier-Stokes.

O Método dos Volumes Finitos, no qual as equações aproximadas são obtidas através de balanços de conservação em um volume elementar. Este método é o mais empregado, devido às características conservativas em nível discreto e sua alta robustez, o que é muito importante em escoamento de fluidos, pois a solução da equação diferencial é em nível de volumes finitos. (MALISKA, 2004, apud ABRAMCHUK, 2014, p. 26)

Com esses métodos, troca-se o domínio contínuo por um domínio discreto, onde um conjunto de volumes de controle é utilizado para representar o domínio original, como pode ser observado na Figura 8, abaixo. (KESSLER, 2016)

Figura 8 - Domínio Original



Fonte: Kessler (2016)

As principais características do método dos volumes finitos são a simplicidade da derivação e a facilidade com que as equações discretizadas podem ser interpretadas em termos físicos. A equação diferencial básica expressa um balanço através de um volume de controle infinitesimal; a equação discretizada pelo método dos volumes finitos é simplesmente a representação finita da equação diferencial. (MUNIZ, 1995, p. 20)

O mecanismo de resolução usado pelo ANSYS® CFD é baseado no método dos volumes finitos. Segundo o próprio manual (ANSYS, 2011), a metodologia de solução segue os seguintes passos:

- O domínio é discretizado em um conjunto de volumes de controle.
- Equações gerais de conservação (transporte) para massa, momento, energia, etc., são resolvidos neste conjunto de volume de controle.
- Equações diferenciais parciais são discretizadas em um sistema de equações algébricas.
- Todas as equações algébricas são então resolvidas numericamente para renderizar o campo da solução.

2.6.2 Modelos de turbulência para análise de escoamentos

Dentre os modelos de turbulência existentes, tratar-se-á aqui os de maior relevância para a execução dos objetivos propostos.

2.6.2.1 Modelos K-EPSILON ($k-\epsilon$)

Este é o modelo de turbulência mais utilizado, sendo considerado o modelo padrão industrial. Este tem se mostrado estável e numericamente robusto. Para simulações de propósitos gerais, o modelo $k-\epsilon$ oferece um bom compromisso em termos de precisão e robustez. (SOARES, 2013, p. 41)

O modelo $k-\epsilon$ é baseado em equações de transporte para a energia cinética de turbulência (representada por k) e pela sua taxa de dissipação (chamada de ϵ). Sendo o modelo padrão $k-\epsilon$ composto por estas duas equações, existem casos para os quais o uso pode não ser adequado. Estes são:

- escoamentos com desprendimento da camada-limite.
- escoamentos com mudanças repentinas na taxa de cisalhamento médio.
- escoamentos de fluidos em rotação.
- escoamentos sobre superfícies curvadas.

Além do modelo $k-\epsilon$ padrão, ainda existem duas variações deste. Portanto, o modelo $k-\epsilon$ é apresentável nas formas: Standard $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$ e Realizable $k-\epsilon$. Suas três formas são muito similares, uma vez que as equações de transporte baseiam-se em k e ϵ . As principais diferenças são:

- O método de calcular a viscosidade turbulenta.
- Os números de Prandtl que governam a difusão turbulenta de k e ϵ .
- Os termos de geração e destruição na equação ϵ .

2.6.2.2 Modelo SPALART-ALLMARAS

O modelo de turbulência Spalart-Allmaras tem apresentado grande popularidade em estudos de turbinas, gerando bons resultados para gradientes adversos de pressão. Principalmente, por ter sido desenvolvido para aplicações da fluidodinâmica computacional na área aeroespacial, onde o escoamento sobre superfícies sólidas é importante.

Pode-se considerar que, o refinamento da malha na região da camada limite pode ser mensurado por meio do parâmetro adimensional y^+ , sendo este uma distância adimensional em relação a parede, em sua direção normal.

Por conseguinte, devido à impossibilidade de calcular a subcamada viscosa ou aproximá-la pelas funções de parede, deve-se evitar a utilização de refinamento em regiões parietais que cause valores de y^+ na faixa de $3 < y^+ < 30$, ao se utilizar o modelo viscoso Spalart-Allmaras. Melhor dizendo, não se deve utilizar o modelo na faixa de y^+ entre 3 e 30 pela ausência de um tratamento adequado na região da camada limite (SOARES, 2013, p.40).

Voltando-se para o âmbito das aplicações industriais, Spalart-Allmaras foi desenvolvido para escoamentos aerodinâmicos. Portanto, não se torna aplicável para escoamentos industriais em geral, estando sujeito a erros relativamente grandes para alguns escoamentos cisalhantes livres, especialmente, para escoamentos em jatos circulares ou planos.

De forma concisa, pode-se definir o modelo proposto por Spalart e Allmaras como modelo de única equação que resolve as equações de transporte para uma quantidade que é uma configuração modificada da viscosidade cinemática turbulenta.

2.6.2.3 Modelos K-ÔMEGA ($k-\omega$)

Dentre os modelos de turbulência para análise de escoamento, estudos comprovam que o modelo $k-\omega$ baseia-se na configuração das equações de transporte em função da energia cinética turbulenta (k) e da taxa de dissipação específica (ω), sendo este último termo, interpretado como a proporção de ε em k . Visto que, o modelo $k-\omega$ tem sido modificado ao longo do tempo, novos termos foram adicionados às equações k e ω , melhorando a precisão do modelo para escoamentos cisalhantes livres. Em termos gerais, assim como $k-\varepsilon$, o modelo $k-\omega$ possui variações: Standard $k-\omega$ e SST $k-\omega$. (SOARES, 2013, p.44)

2.6.2.3.1 Standard $k-\omega$

Observando-se os detalhes supracitados, de encontro ao modelo Standard $k-\omega$ disponível no *software* ANSYS Fluent, esse ainda possui a opção de correção, a ser ativada quando desejada, para aplicação a baixo número de Reynolds. Em concordância aos estudos realizados por Soares (2013, p.41), isso se aplica ao fato que a formulação do modelo $k-\omega$ para baixo número de Reynolds, pode produzir um atraso do início da camada-limite turbulenta na parede e, portanto, incide um modelo muito simples para transição laminar-turbulento. A mesma proposta pode ter efeitos negativos principalmente para escoamento livre, apesar das melhorias ao longo do tempo para escoamentos fora da camada cisalhante.

Portanto, não é recomendado o uso de baixo número de Reynolds para o modelo $k-\omega$, quando para transição laminar-turbulento e escoamento cisalhante livre. Sendo, nesses casos, aconselhado o uso de outros modelos, mais sofisticados e calibrados.

2.6.2.3.2 SST $k-\omega$

O modelo Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$, desenvolvido por para combinar efetivamente a formulação precisa e robusta do modelo $k-\omega$ na região próxima da parede com independência do escoamento livre do modelo $k-\varepsilon$ na região mais distante, conhecida como *farfield*. Para isto, uma transição ocorre do modelo $k-\omega$, próximo da parede, para o modelo $k-\varepsilon$, em certa distância.

Observando-se as versões SST e Standard, é possível afirmar que ambas as variações possuem formas similares, porém, diferem-se nos seguintes quesitos:

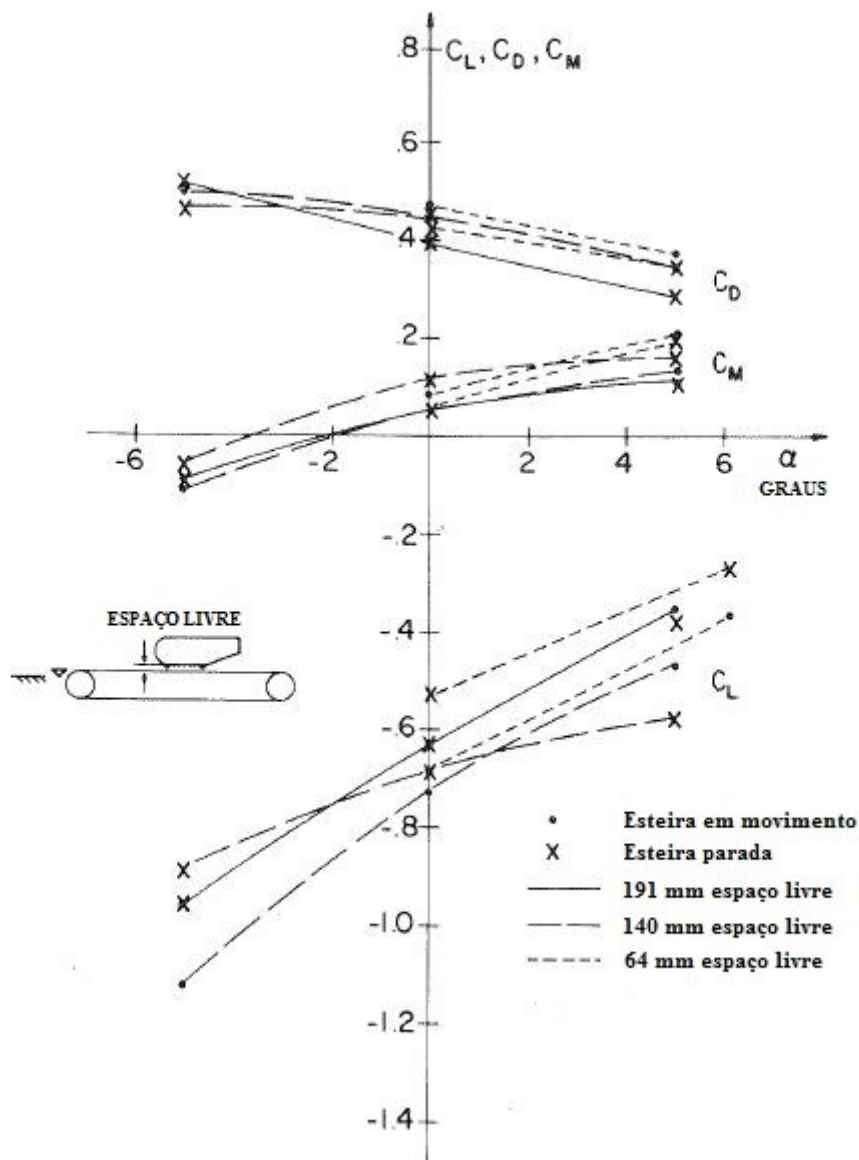
- Mudança gradual a partir do modelo Standard $k-\omega$ (na região interna da camada-limite) para a versão de $k-\varepsilon$ em alto número de Reynolds (na região externa da camada-limite).
- Formulação modificada da viscosidade turbulenta para considerar o transporte das tensões de cisalhamento turbulentas.
- Incorporação de termo.
- As constantes na modelagem são diferentes.

Portando, dessa forma, o aperfeiçoamento para SST $k-\omega$, quando comparado com o modelo Standard $k-\omega$, resultou em um modelo mais preciso e confiável para uma vasta classe de escoamentos. São exemplos destes escoamentos: gradientes de pressão abruptos, aerofólios e ondas de choque transônicas.

2.7 Efeito Solo

Em 1981, A. R. George publicou um artigo que relatava seu experimento realizado em um túnel de vento, no qual consistia em testar a influência do fluxo de ar para diferentes parâmetros. Um destes, consistia em alterar a altura de um corpo com relação ao chão em movimento relativo e analisar a influência do fluxo de ar para cada caso. Na Figura 9 está apresentado o resultado do seu experimento.

Figura 9 - Sustentação, arrasto e momento de lançamento de um corpo com diferentes valores de espaços livre com esteira em movimento e parada.



Fonte: Adaptado de George (1981)

Onde, C_L = coeficiente de sustentação

C_D = coeficiente de arrasto

C_M = momento de lançamento

Para seu experimento, A. R. George (1981) utilizou um modelo com rodas, superfície inferior rugosa e ângulo de saída de 20° , em seguida, alterou a altura do corpo em relação ao solo para diferentes ângulos de ataque e fez uma análise dos coeficientes de arrasto, sustentação e momento de lançamento. George também fez o teste para sua esteira com movimento e sem movimento. Com 191 mm de altura, o efeito da movimentação da esteira não foi notório, o coeficiente

de sustentação e momento de lançamento aumentaram com o aumento do ângulo de ataque e o coeficiente de arrasto diminuiu com este aumento de ângulo. Essas variações de coeficientes e momento foram observadas nas três diferentes alturas do corpo com relação a esteira. Com 140mm de altura, o efeito da movimentação da esteira torna-se significativo, mas é na altura de 64mm que o efeito é melhor observado, com a esteira em movimento tem-se um aumento significativo no *downforce* e no arrasto. Além disso, o gráfico mostra que em um ângulo de ataque de 0° , o coeficiente de arrasto é maior quando a altura do corpo com relação ao chão é menor.

Em suas conclusões, George cita que como em casos reais há movimentação do corpo ao longo de um trajeto, como mostrado na esteira em movimento, valores baixos da altura com relação ao chão tendem a aumentar o arrasto e o *downforce*.

Segundo Zhang et al. (2006), existem basicamente três formas de estudar o efeito da altura do corpo com relação ao solo na aerodinâmica: com testes na pista em escala real, por meio de simulação CFD, e em túnel de vento. Testes de modelos em escala real acabam sendo aplicados apenas no resultado final, não sendo viáveis na fase de desenvolvimento. A análise em túnel de vento ainda é a ferramenta de maior relevância no estudo aerodinâmico da altura do corpo com relação ao solo, entretanto, a simulação CFD vem desenvolvendo um papel muito importante neste estudo e é provavelmente a área que mais evoluiu com o tempo.

Segundo Hucho (1998), quando um corpo está próximo ao solo, forma-se um canal de estreitamento entre eles, no qual o fluxo é acelerado e depois desacelerado. Isso resulta em uma pressão manométrica média negativa na parte inferior do carro, tendendo a gerar *downforce*. Além disso, para se conseguir produzir uma grande força descendente, pode ser feito um confinamento do fluxo ar que passa em baixo do carro, lembrando um túnel de Venturi. Esse método é ainda mais efetivo se usado saias laterais na parte inferior do modelo. Com isso, um grande *downforce* é gerado com uma pequena penalidade no arrasto.

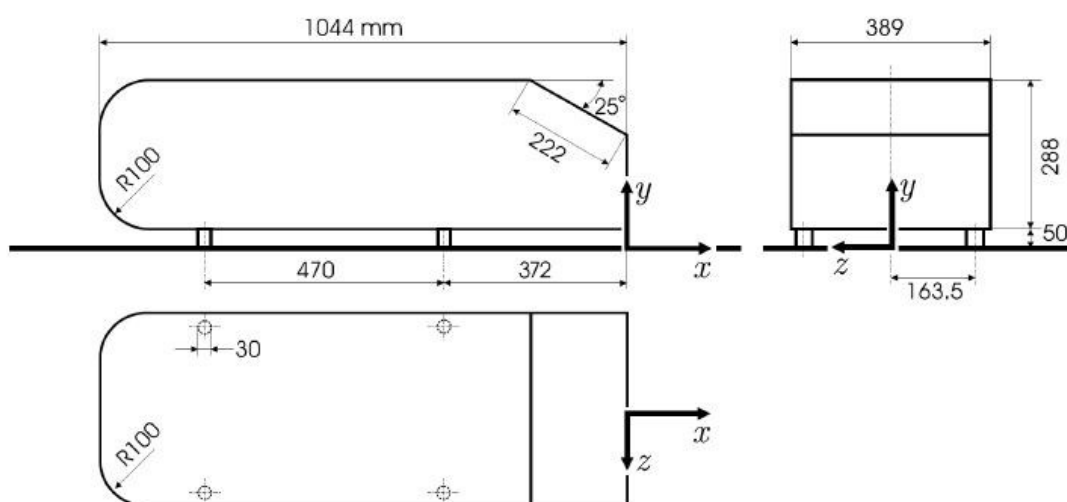
Soares (2013), em seu trabalho de conclusão de curso, realizou um estudo sobre o efeito solo para um perfil NACA 0012, simulando um aerofólio dianteiro. As simulações foram feitas para diferentes alturas do modelo em

relação ao chão, variando entre 50 mm e 200 mm, para uma velocidade de 115 km/h. Em sua discussão de resultados, Soares (2013) confirmou o efeito solo, observando um aumento de *downforce*, acompanhado de um pequeno aumento de arrasto.

3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para a validação dos modelos pelo *software*, utilizou-se um modelo já conhecido da teoria, o corpo de Ahmed. Descrito originalmente por S. R. Ahmed em 1984⁴. O corpo de Ahmed tornou-se um importante método de validação para o automobilismo, pois servia de calibração para túneis de vento e modelos de turbulência executados em programas de CFD. O corpo de Ahmed possui medidas padrão, que diferem entre si no ângulo de saída do veículo, para essa simulação será utilizado um ângulo de 25°. A Figura 10 apresenta as dimensões.

Figura 10 - Dimensões do corpo de Ahmed

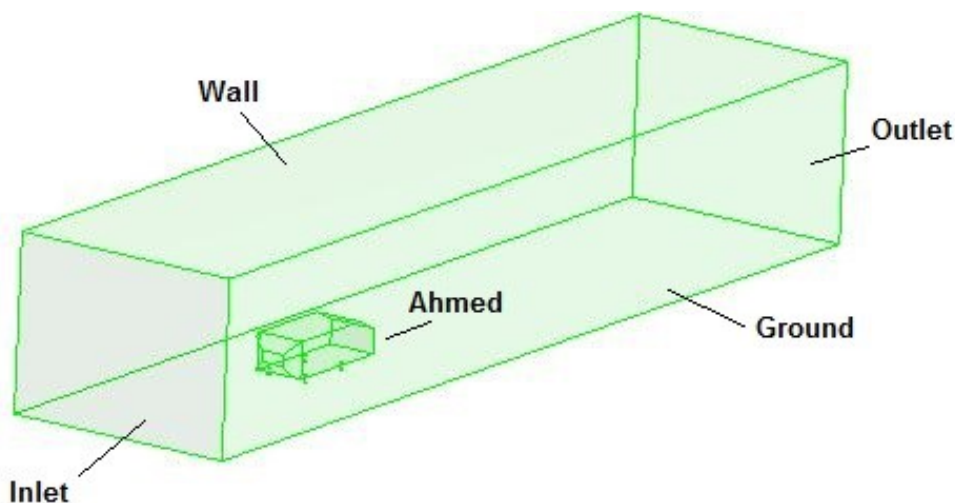


Fonte: R. Zamolo, E. Nobile (2017)

Para a preparação do domínio de solução computacional, o corpo de Ahmed foi subtraído do volume interno, estratégia essa usada para a análise de fluxo externo ao corpo. A seguir, foram nomeadas as faces necessárias para a geração da malha e configurações de contorno, sendo elas: *Inlet*, parede de entrada do fluxo de ar sobre o volume de controle. *Wall*, parede superior e paredes laterais do volume de controle. *Ground*, parede inferior que caracteriza o solo. *Outlet*, parede de saída do escoamento. A Figura 11, apresenta o volume de controle e suas nomeações.

⁴ S.R. Ahmed, G. Ramm, Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake, SAE-Paper 840300, 1984

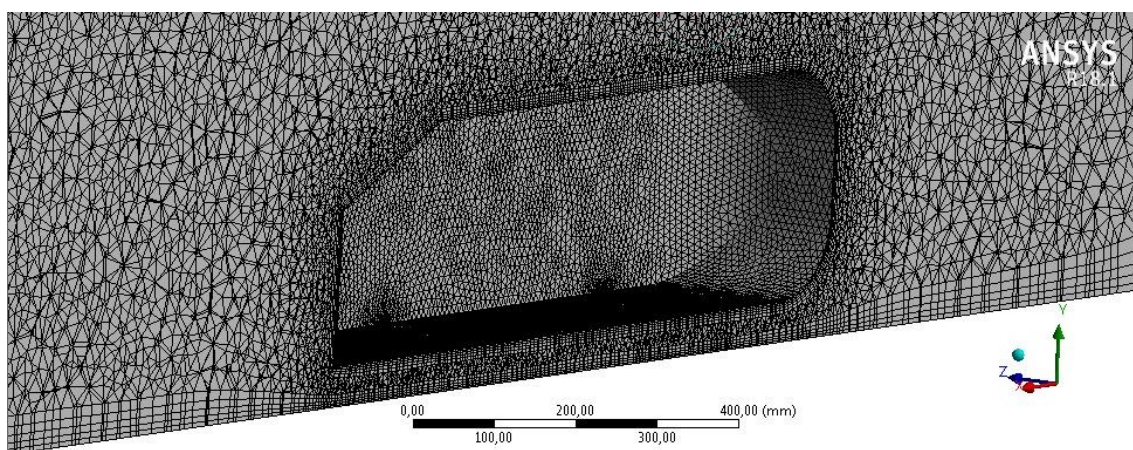
Figura 11 - Corpo de Ahmed dentro do domínio de solução computacional



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS® 18.1. (2019)

Para a geração da malha, foram adotados tamanhos de elementos de 10 mm para o corpo de Ahmed, 30 mm para as regiões próximas ao modelo, e um tamanho de elementos máximo de 100 mm. Além disso, foi utilizado o recurso *inflation* para o corpo de Ahmed e para o *ground*. Esse recurso faz com sejam criadas camadas extras próximas a estes modelos que são considerados os mais importantes para a simulação. A malha apresentou um número de 368.367 nós e 1.489.399 elementos. A Figura 12 apresenta a malha gerada no corpo de Ahmed.

Figura 12 - Malha gerada no corpo de Ahmed



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS® 18.1. (2019)

Após a geração da malha, o próximo passo é configurar os parâmetros da simulação pelo *solver* CFX. O modelo de turbulência utilizado é o SST k- ω , devido a sua alta precisão para escoamentos externos de modelos aerodinâmicos.

A velocidade de entrada no domínio (*inlet*) foi ajustada para 40 m/s. Outro fator, a pressão absoluta na saída do volume de controle (*outlet*), foi calculada para 0 atm. A intensidade de turbulência foi regulada para 5%, por ser um valor de intensidade média do *software*. O fluido utilizado é o ar incompressível na temperatura de 25°C, com pressão absoluta de 1 atm. Sua densidade é de 1,185 kg/m³ e viscosidade equivalente a 1,845x10⁻⁵ kg/m.s. Portanto, por meio da equação do número de Reynolds, equação (4) acima citada, temos seu valor de 2,68X10⁶.

O critério de convergência foi ajustado para um valor residual de 10⁻⁵ ou 200 iterações. O tempo de simulação até ser atingida a convergência foi de 56 minutos.

A seguir, é calculado o coeficiente de arrasto, em regime estacionário, para o modelo.

Tabela 1 - Resultados para simulação do corpo de Ahmed

Força de arrasto (F_D)	35,5991 [N]
Área frontal (A)	0,115 [m ²]
Densidade do ar (ρ)	1,185 [kg/m ³]
Velocidade (v)	40 [m/s]

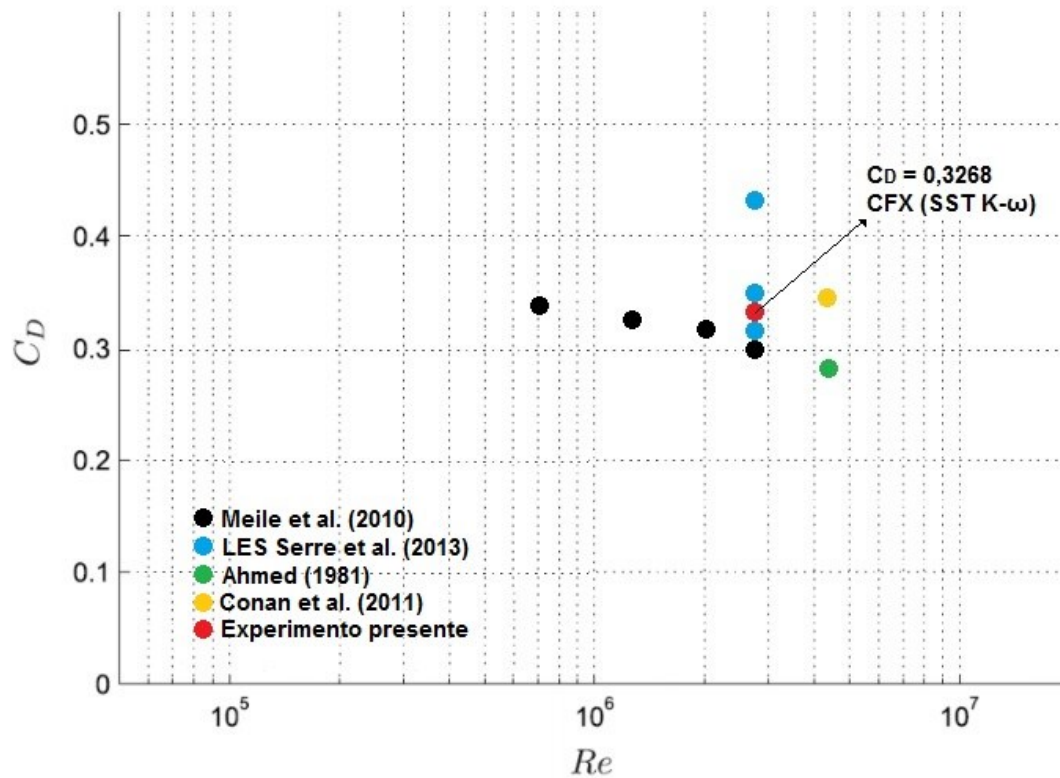
Fonte: Autoria própria (2019)

Segundo a equação 11, para o coeficiente de arrasto, teremos:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (11)$$

$$C_D = 0,3268$$

Figura 13 - Comparação entre coeficientes de arrasto teóricos

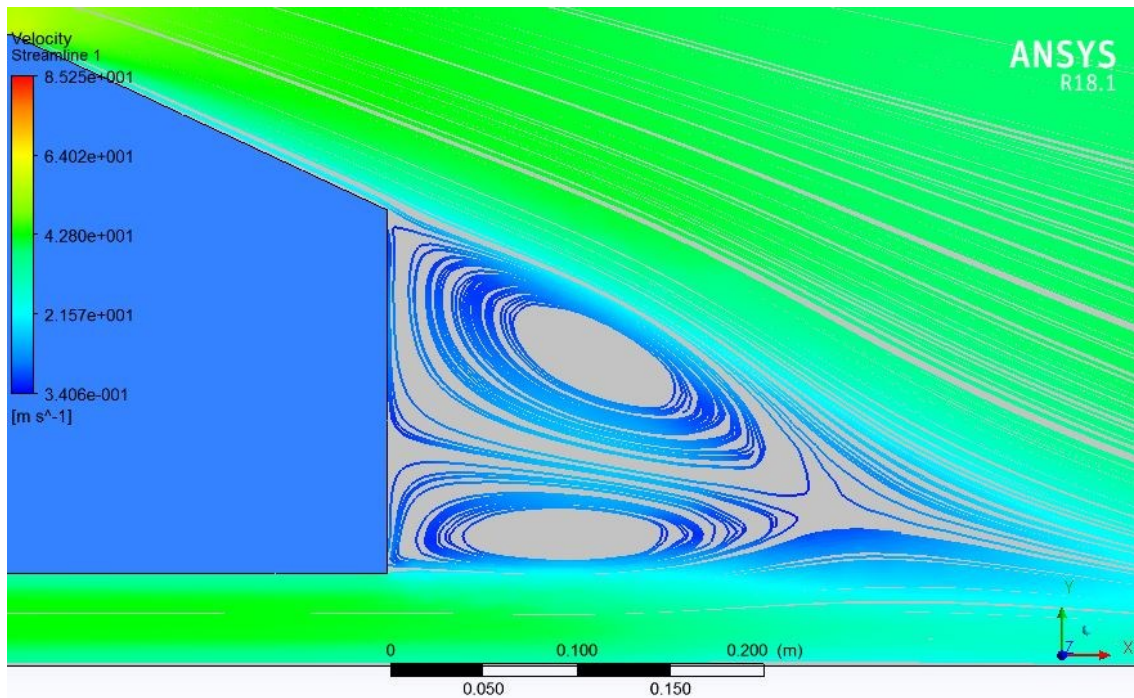


Fonte: Adaptado de R. Zamolo, E. Nobile (2017)

Comparando as linhas de velocidade encontradas na simulação, com as linhas de velocidade apresentadas por H. Lienhart, C. Stoots, and S. Becker (2002)⁵, podemos notar a recirculação apresentada na zona traseira do modelo, além do comprimento dessa recirculação até o fluxo voltar a ser laminar, como mostram as Figuras 14 e 15, respectivamente, a seguir.

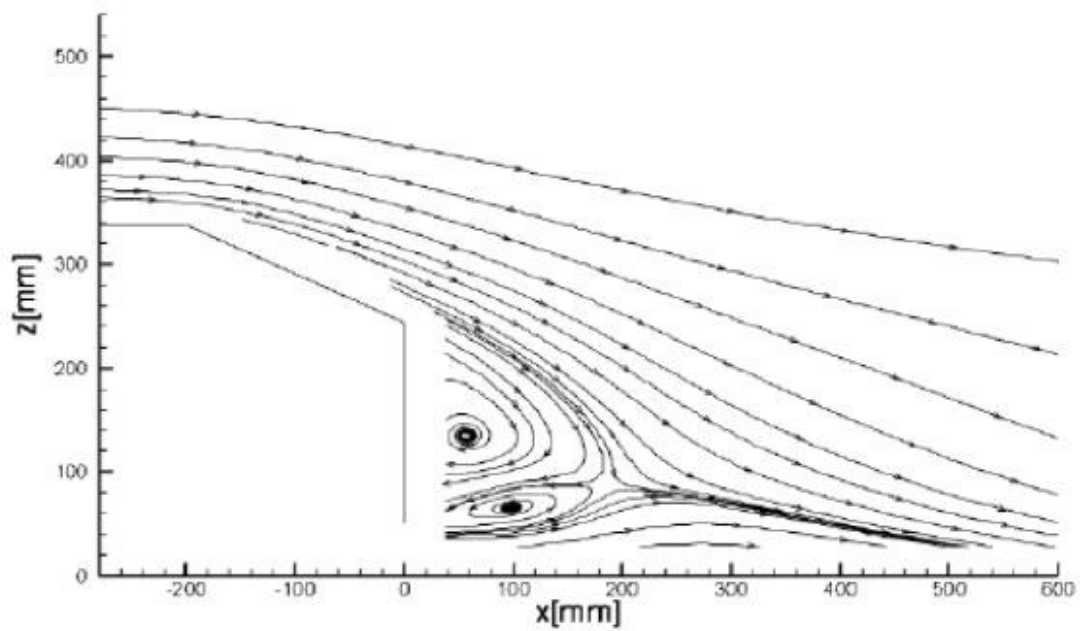
⁵ (H. Lienhart, C. Stoots, and S. Becker. Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model), pages 323–330. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2002.)

Figura 14 - Linhas de corrente para o corpo de Ahmed através do software ANSYS



Fonte: Autoria própria (2019)

Figura 15 - Linhas de corrente para o corpo de Ahmed



Fonte: H. Lienhart, C. Stoots, e S. Becker (2002)

4 PROTÓTIPOS PADRÃO SHELL ECO-MARATHON

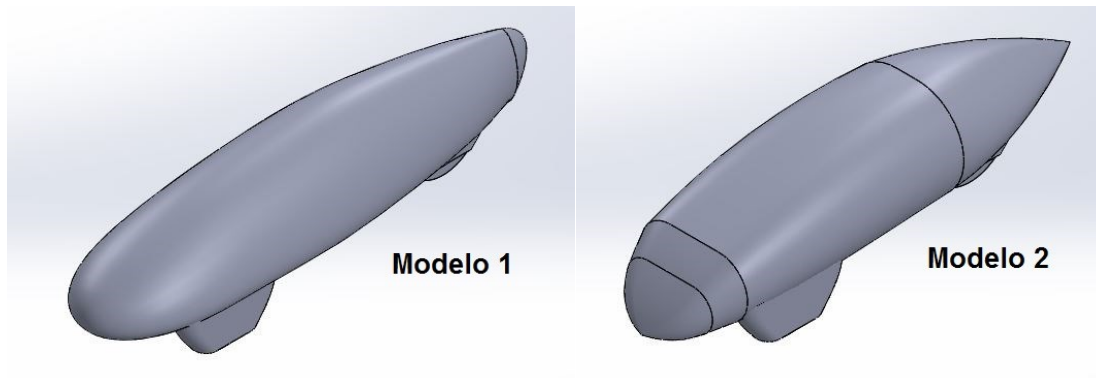
A modelagem geométrica dos protótipos foi realizada por meio do *software* SolidWorks® versão 2016. Para as simulações fluidodinâmicas computacionais utilizou-se o *software* ANSYS® 18.1.

Com relação às medidas empregadas na modelagem do protótipo, foram dimensionadas respeitando as regras da Shell Eco-marathon 2019. A seguir, apresenta-se as principais regras seguidas com relação as dimensões do protótipo:

- A altura do protótipo deve ser de no máximo 1000 mm;
- A distância entre rodas que estejam no mesmo eixo deve ser de no mínimo 500 mm;
- A razão entre altura do protótipo e distância entre eixos deve ser de pelo menos 1,25;
- A distância entre eixos deve ser de pelo menos 1000 mm;
- A largura máxima do protótipo não deve exceder 1300 mm;
- O comprimento total do protótipo não deve exceder 3500 mm;
- O raio de giro deve ser de 8 m ou menos;
- Os protótipos devem ter espaço livre de pelo menos 100 mm entre a frente do veículo e os pés do motorista;
- Anexos aerodinâmicos, que se ajustam ou são propensos a alterar sua forma com o vento, não são permitidos;
- Todos os veículos devem ser fechados. Veículos com o topo aberto não são permitidos. Veículos que se pareçam com bicicletas, triciclos ou cadeiras de roda não são permitidos.

Respeitando as dimensões determinadas no regulamento, dois modelos de protótipos foram criados. A Figura 16 apresenta os dois protótipos.

Figura 16 - Modelos de protótipos



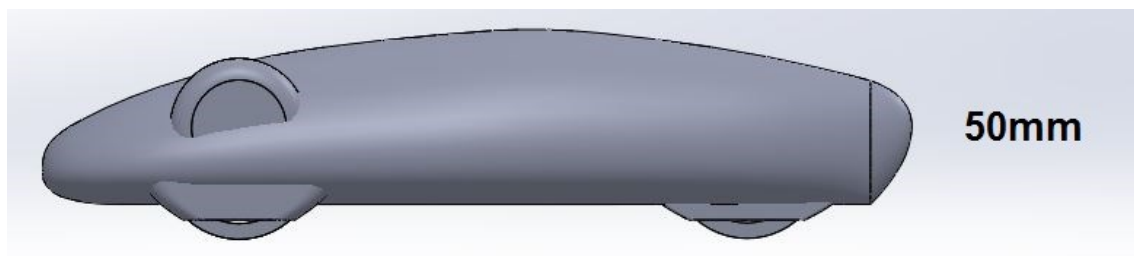
Fonte: Autoria própria realizada no SolidWorks® 16 (2019)

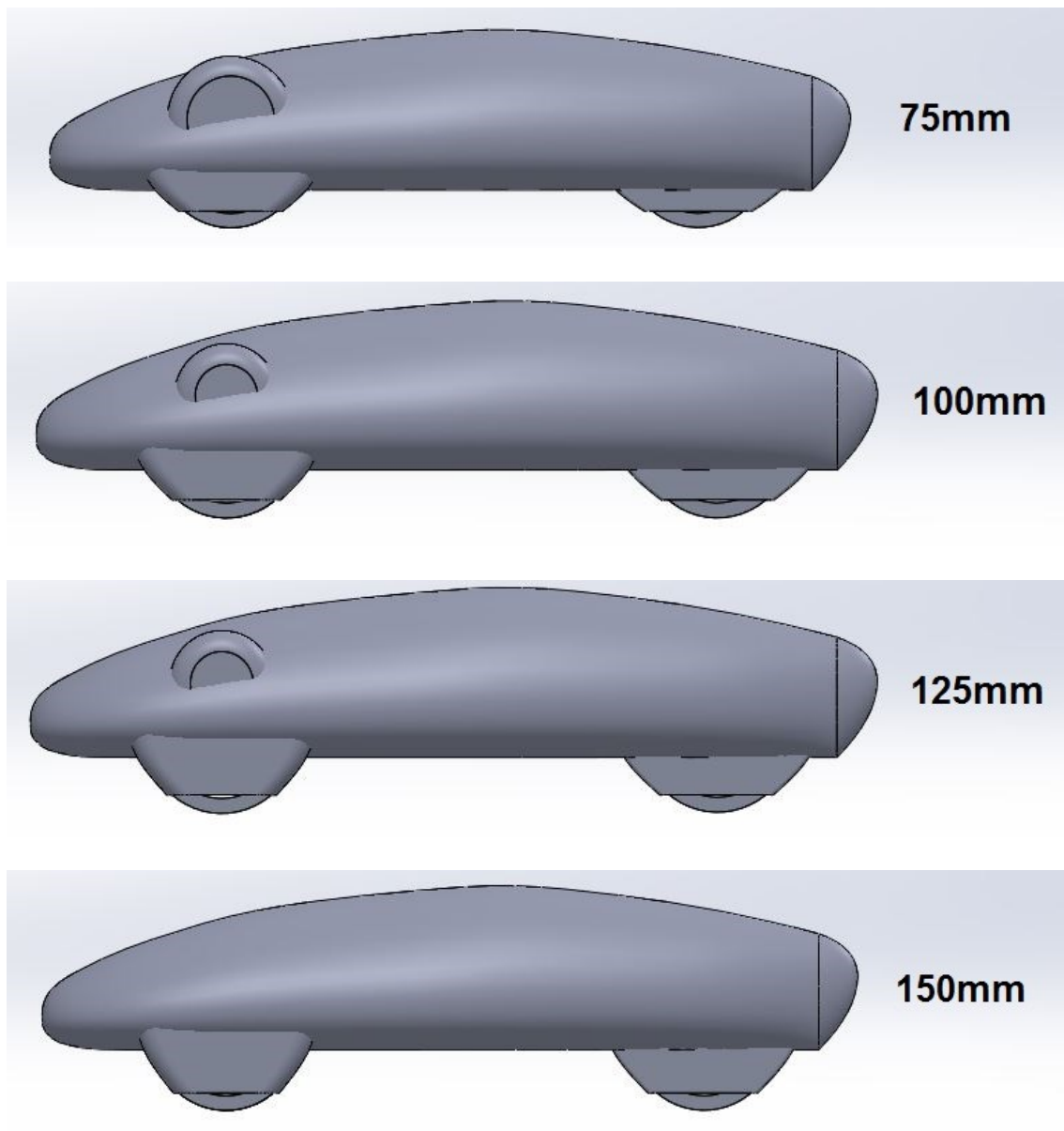
Os dois modelos recriam formas aerodinâmicas conhecidas por suas eficiências, além disso, foram tomadas como inspiração para modelagem diversos protótipos de diferentes equipes do mundo que disputam as competições da Shell Eco-marathon.

4.1 Modificação da altura com relação ao solo

Como esse estudo busca analisar a influência do efeito solo, os modelos de protótipos passaram por algumas modificações. Para ambos os modelos, foram utilizadas as seguintes alturas do assoalho do protótipo com relação ao solo: 50 mm, 75 mm, 100 mm, 125 mm e 150 mm. A Figura 17 apresenta as alterações feitas no modelo 1.

Figura 17 - Variação da altura do protótipo com relação ao solo para o modelo 1





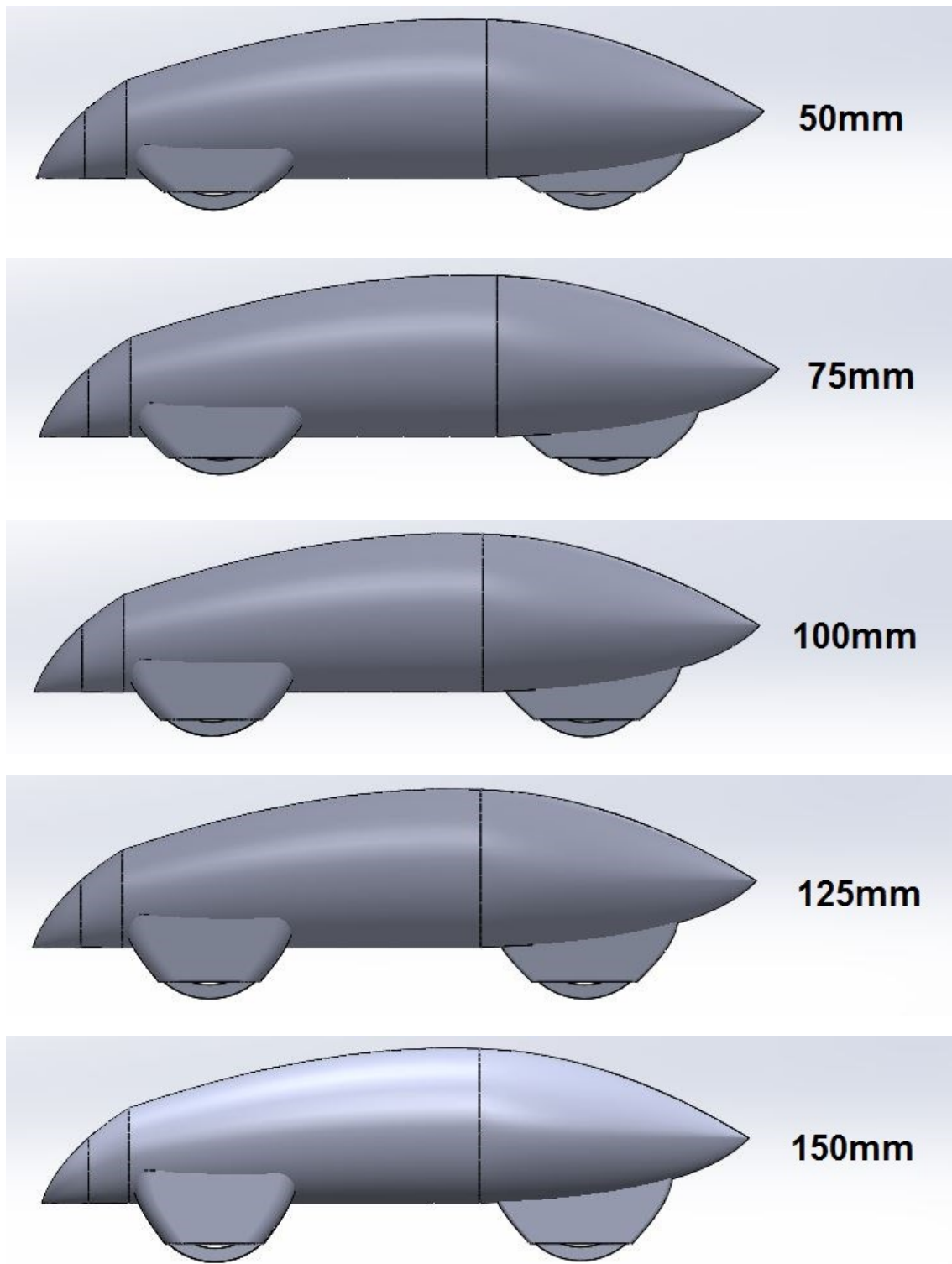
Fonte: A autoria própria realizada no SolidWorks® 16. (2019)

Devido a baixa altura da carenagem, teve-se que acrescentar um corpo arredondado na altura das rodas dianteiras para os modelos com 50 mm, 75 mm, 100 mm e 125 mm com relação ao solo. As rodas dianteiras para o modelo com 150 mm de altura não ficam acima da carenagem, além disso, as rodas fazem o giro necessário sem tocar no corpo, portanto não foi necessário o acréscimo da camada arredondada.

O modelo 2 apresenta uma maior altura de carenagem e área frontal se comparado ao modelo 1, essa maior altura de carenagem faz com que não se

tenha a necessidade de acrescentar um corpo acima das rodas dianteiras, pois os pneus rodam sem contato com a carenagem. A Figura 18 apresenta as variações de altura do assoalho do protótipo com relação ao solo para o modelo 2.

Figura 18 - Variação da altura do protótipo com relação ao solo para o modelo 2



Fonte: A autoria própria realizada no SolidWorks® 16. (2019)

5 RESULTADOS PARA OS PROTÓTIPOS PADRÃO SHELL ECO-MARATHON

Para as dimensões do domínio de solução, foram determinadas algumas regras nas medidas, para o comprimento e largura do domínio foi utilizado um valor de 15 vezes o comprimento e largura do modelo do protótipo, e para altura do volume de controle foi utilizado um valor de 10 vezes a altura do modelo, para que o escoamento não seja mais influenciado pelo objeto, conforme recomendação do *software*. Essas dimensões fazem com que o volume de controle se aproxime de um caso real, aumentando assim a precisão da simulação.

As dimensões dos modelos 1 e 2 são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 2 - Dimensões do volume de controle e protótipo para o modelo 1

Modelo 1	Dimensões
Comprimento do protótipo	2838 mm
Largura do protótipo	733 mm
Altura do protótipo	780 mm
Comprimento do domínio	42,570 m
Largura do domínio	10,995 m
Altura do domínio	7,8 m

Fonte: Autoria própria (2019)

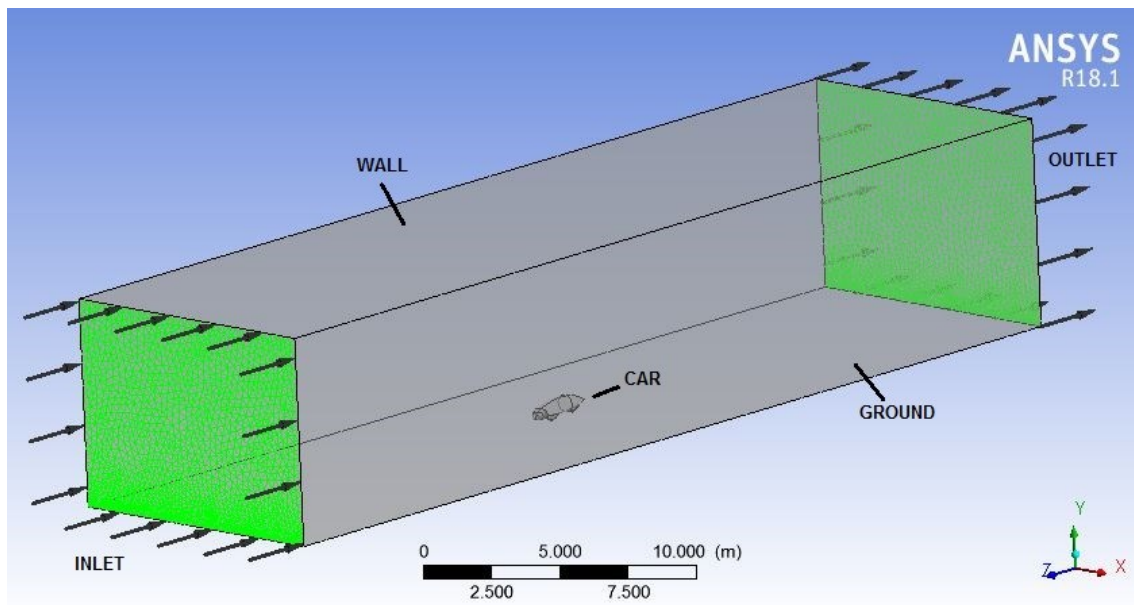
Tabela 3 - Dimensões do volume de controle e protótipo para o modelo 2

Modelo 2	Dimensões
Comprimento do protótipo	2623 mm
Largura do protótipo	720 mm
Altura do protótipo	783 mm
Comprimento do domínio	39,345 m
Largura do domínio	10,8 m
Altura do domínio	7,83 m

Fonte: Autoria própria (2019)

O domínio de solução para os modelos 1 e 2 se assemelha ao utilizado para o corpo de Ahmed, porém os modelos são nomeados como *Car*. Além disso, o movimento do protótipo se dá no sentido positivo do eixo z, como mostra a Figura 19 a seguir.

Figura 19 - Volume de controle para os modelos 1 e 2



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS ® 18.1. (2019)

Para aproximar as simulações de um caso mais real, foi adicionada uma velocidade de 10 m/s no *ground*, no sentido do fluxo em *inlet*, isso serve para simular o movimento do protótipo. A tabela a seguir apresenta as condições no domínio estudado.

Tabela 4 - Condições de contorno no domínio do fluido

Fronteira	Condição
Inlet	velocity-inlet ($v = 10$ m/s)
Outlet	pressure-outlet (pabs = 0 atm)
Wall	wall (free slip wall)
Ground	wall ($v = 10$ m/s)
Car	wall (sem rugosidade)

Fonte: Autoria própria (2019)

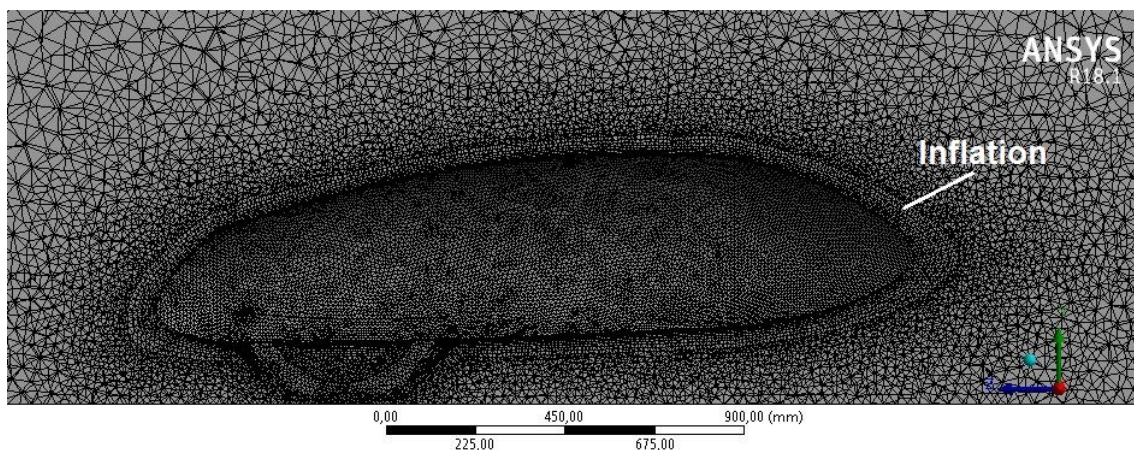
Além das condições de fronteira apresentados, o fluido utilizado é o ar incompressível na temperatura de 25°C, sua densidade é de 1,185 kg/m³ e viscosidade equivalente a 1,845x10⁻⁵ kg/m.s. O número de Reynolds para o modelo 1 é de 1,82x10⁶, já para o modelo 2, seu valor é de 1,68x10⁶.

O modelo de turbulência utilizado é novamente o SST $k\omega$, com intensidade de turbulência de 5%, pois trata-se de um valor médio. O critério de convergência é atingir um valor residual de 10⁻⁵ ou 100 iterações. O regime é

estacionário, tanto para as simulações do modelo 1 como do modelo 2. O arrasto gerado devido ao atrito da carenagem do protótipo não será considerado.

Para a geração da malha, foi utilizado o método de elementos tetraédricos por todo volume de controle, devido sua facilidade em adequação a formas complexas e que mantém o processo de geração mais estável. Foram adotados tamanhos de elementos de 10 mm para os modelos, 100 mm para o *ground*, 300 mm para *inlet*, *outlet* e *wall*, assim como foi definido um tamanho mínimo para os elementos de 300 mm. Além disso, foi utilizado o recurso de *inflation* com 10 camadas para a região do protótipo, afim de aumentar a precisão na região da camada limite em função do modelo de turbulência. A Figura 20 apresenta as camadas geradas por meio do recurso *inflation*.

Figura 20 - Camadas de *inflation* geradas na região do protótipo



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS ® 18.1. (2019)

5.1 Simulações para o modelo 1

Após definidos os parâmetros de malha e *setup*, as configurações foram aplicadas para as diversas alturas dos dois modelos. A tabela 5, a seguir, apresenta os dados de nós e elementos gerados para o modelo de protótipo 1, além do tempo de processamento e o *Yplus* na região do protótipo.

Tabela 5 - Dados de malha e setup para o modelo 1

Altura [mm]	Nós	Elementos	Tempo de processamento [min]	<i>Yplus</i> (y+)
50	1.400.541	5.487.520	112	39,4379
75	1.429.345	5.576.579	111	38,9841
100	1.436.468	5.619.851	112	38,6234
125	1.457.006	5.692.385	114	38,7187
150	1.426.212	5.621.805	176	39,6498

Fonte: Autoria Própria (2019)

Nota-se um crescimento dos nós e elementos a medida que se aumenta a altura do protótipo com relação ao chão, isso ocorre devido ao aumento da área do protótipo. Para a altura de 150 mm o número de nós e elementos não cresce pois trata-se do modelo que não possui o acréscimo de um corpo arredondado acima das rodas dianteiras, como visto no modelo 1, tendo assim uma área menor. O tempo de processamento é maior para o modelo com altura de 150 mm, o que evidencia a necessidade de um computador com boas configurações, pois trata-se de um *software* de simulações que demanda alta quantidade de processamento.

O manual do Ansys aponta a necessidade de as regiões mais críticas possuírem um valor de *Yplus* abaixo de 200, pois trata-se de um dos fatores que indicam a precisão operacional para a região. Portanto, os valores para as simulações são considerados satisfatórios.

A Tabela 6, a seguir, apresenta os valores das forças normais que atuam sobre o protótipo, essas forças serão utilizadas para o cálculo dos coeficientes de arrasto e sustentação. Além disso, cada modelo possui uma área frontal. Devido ao acréscimo de altura do protótipo, suas áreas frontais aumentam também, pois as caixas de rodas dianteiras e traseira crescem junto com o protótipo.

Tabela 6 - Forças e áreas para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação para o modelo 1

Altura [mm]	Área superior [m ²]	Área frontal [m ²]	Força de sustentação [N]	Força de arrasto [N]	CD	CL (-)
50	4,8159	0,3604	-2,3527	2,4401	0,114367107	0,008252155
75	4,8159	0,3678	-2,27676	2,60936	0,11983966	0,007985794
100	4,8159	0,3691	-2,2138	2,6205	0,119927398	0,00776496
125	4,8159	0,3743	-2,1772	2,7725	0,125120946	0,007636584
150	4,8159	0,3763	-1,8447	2,8602	0,128392743	0,006470332

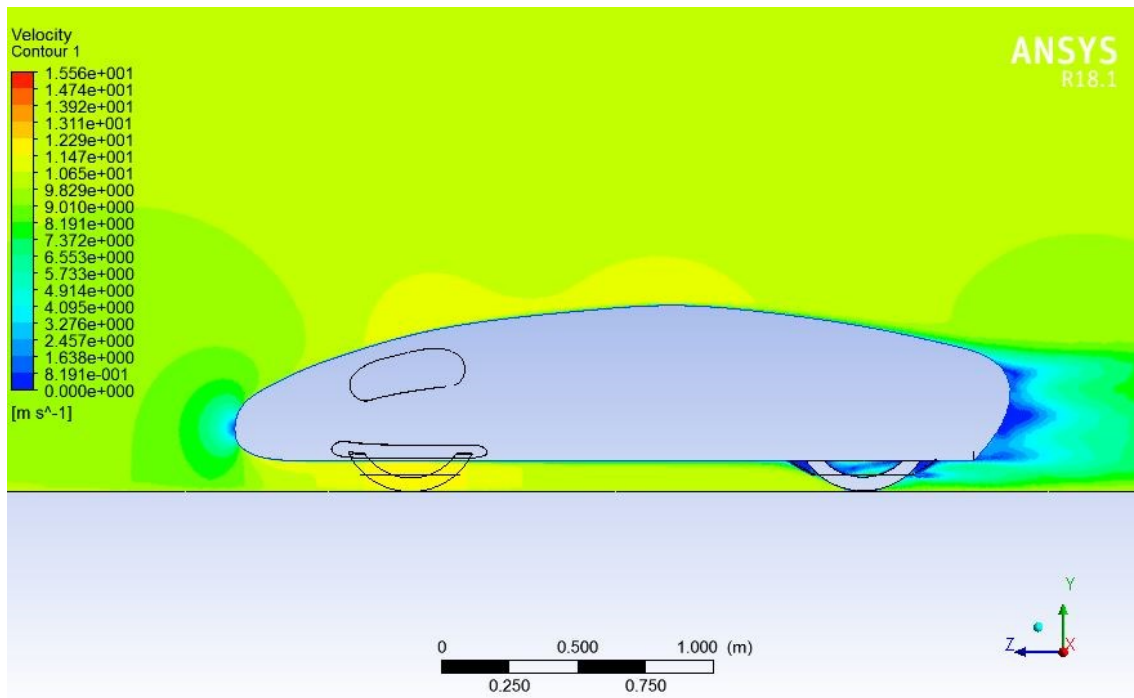
Fonte: Autoria Própria (2019)

Para o modelo do protótipo 1, notamos um aumento do arrasto a medida que o protótipo aumenta sua altura. Esse comportamento não é o esperado, visto que a teoria diz que um aumento na altura do protótipo com relação ao solo diminuiria seu coeficiente de arrasto. Uma possível causa para esse aumento pode estar relacionada ao aumento da área frontal, visto que, nos modelos teóricos a área se mantém constante, alterando apenas a altura com relação ao solo. Mais adiante serão realizadas simulações considerando apenas a variação de altura.

Já para o coeficiente de sustentação, os resultados seguem a lógica da teoria. Quanto mais próximo ao chão o modelo está, maior será o *downforce* no protótipo.

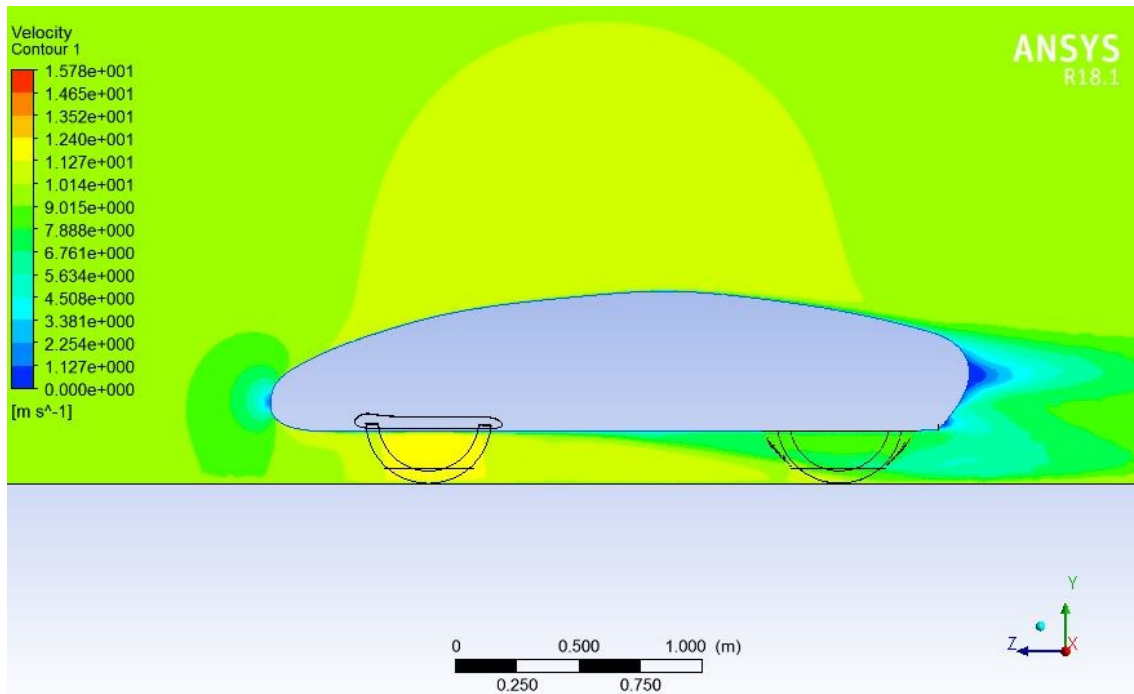
Por meio da análise das linhas de velocidade, podemos notar que modelos mais próximos ao chão possuem um fluxo de ar com maior velocidade, isso se dá devido ao confinamento do fluxo entre o solo e o protótipo. Esse aumento na velocidade faz com que a pressão em baixo do protótipo diminua, assim, a força que empurra a superfície do protótipo contra o solo é maior, tornando o *downforce* maior. As Figuras 21 e 22 mostram os contornos de velocidade para as alturas de 50 mm e 150 mm do modelo 1.

Figura 21 - Contornos de velocidade para altura de 50 mm do modelo 1



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS ® 18.1. (2019)

Figura 22 - Contornos de velocidade para altura de 150 mm do modelo 1



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS ® 18.1. (2019)

5.2 Simulações para o modelo 2

As configurações para criação de malha e *setup* dos cálculos foram recriadas para o modelo 2 e suas variações de alturas. A tabela a seguir apresenta os dados de nós e elementos gerados para o modelo de protótipo 2, além do tempo de processamento e o *Yplus* na região do protótipo.

Tabela 7 - Dados de malha e setup para o modelo 2

Altura [mm]	Nós	Elementos	Tempo de processamento [min]	<i>Yplus</i> (y+)
50	1.231.068	4.878.368	147	39,4199
75	1.237.065	4.911.609	97	39,5447
100	1.261.197	5.004.450	158	39,3756
125	1.294.506	5.109.208	101	39,0483
150	1.304.994	5.173.971	158	38,8536

Fonte: Autoria própria realizada no Excel®. (2019)

Mais uma vez, uma maior área de protótipo resultou em um aumento dos nós e elementos gerados na malha. O tempo de cálculo da simulação variou bastante devido a utilização de dois computadores para se realizar as simulações, sendo o processador de um deles mais avançado que o outro.

Para as forças de arrasto e sustentação calculadas, os dados são apresentados na tabela a seguir:

Tabela 8 - Forças e áreas para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação para o modelo 2

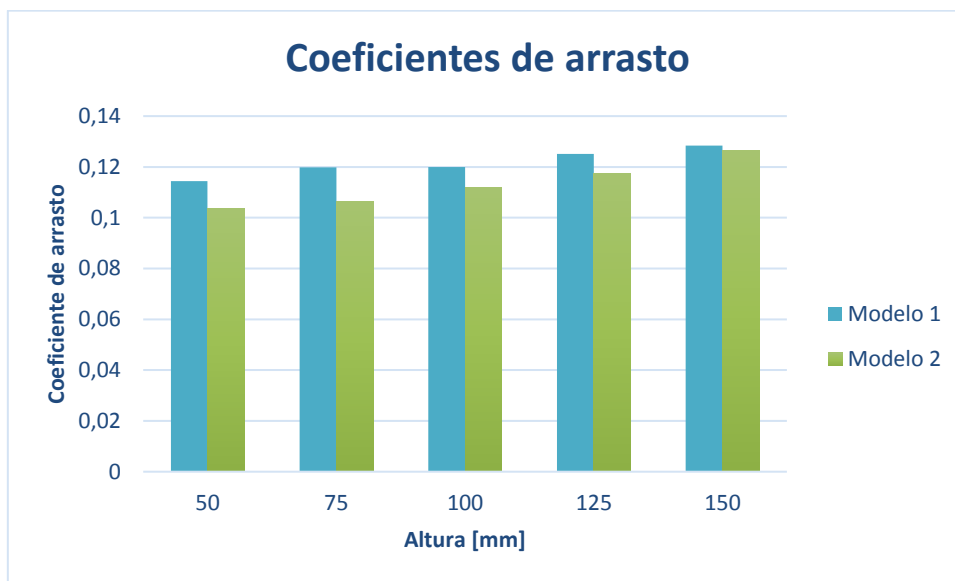
Altura [mm]	Área superior [m ²]	Área frontal [m ²]	Força de sustentação [N]	Força de arrasto [N]	CD	CL (-)
50	4,4176	0,3878	-3,0158	2,3797	0,103655583	0,011531729
75	4,4176	0,3955	-2,9581	2,4951	0,106566269	0,011311098
100	4,4176	0,4031	-2,8737	2,6675	0,111781497	0,010988371
125	4,4176	0,4115	-2,4744	2,8581	0,117323733	0,00946154
150	4,4176	0,4199	-2,0665	3,1444	0,126494082	0,007901823

Fonte: Autoria própria realizada no Excel®. (2019)

Novamente, observamos um maior coeficiente de arrasto para maiores alturas, assim como um aumento na área frontal. O *downforce* mantém a relação de ser maior para as menores alturas.

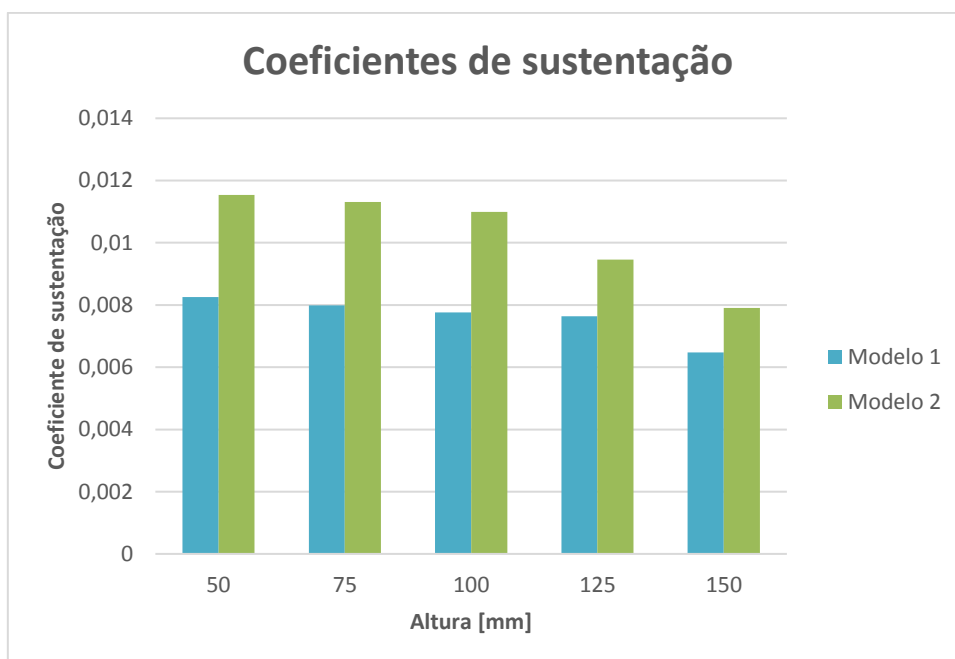
Um comparativo entre os coeficientes de arrasto e sustentação dos modelos 1 e 2 são apresentados nas Figuras 23 e 24.

Figura 23 – Coeficientes de arrasto para os modelos 1 e 2



Fonte: Autoria própria realizada no Excel®. (2019)

Figura 24 – Coeficientes de sustentação para os modelos 1 e 2

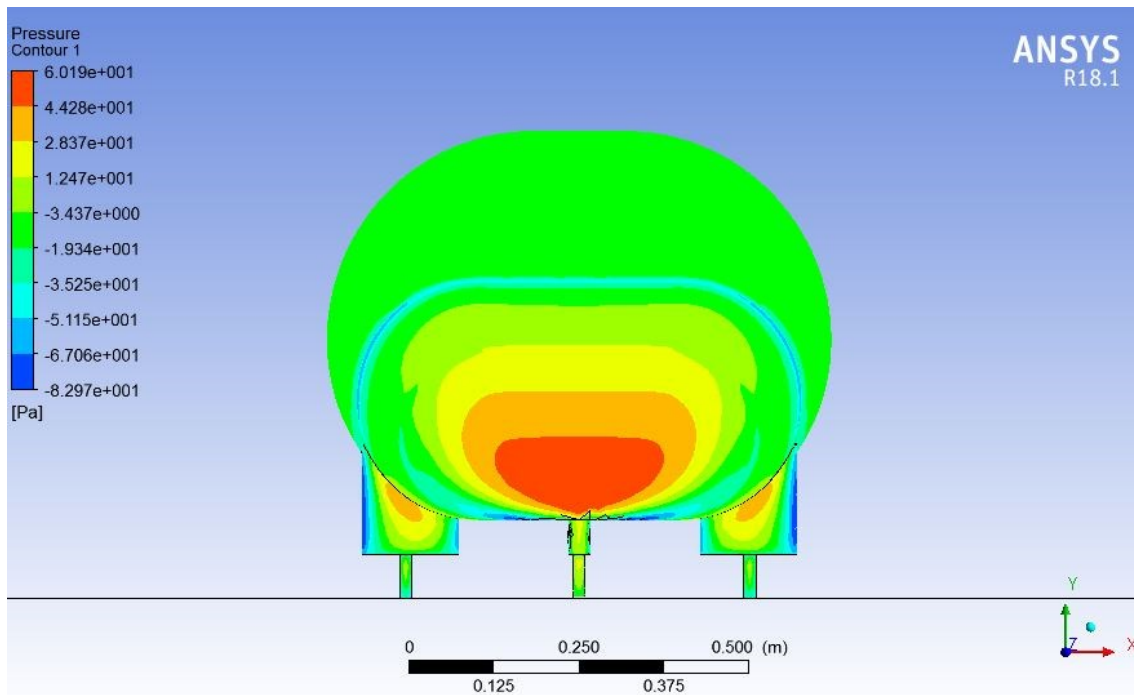


Fonte: Autoria própria realizada no Excel®. (2019)

Nota-se que o modelo 2 possui menor coeficiente de arrasto e maior *downforce* quando comparado ao modelo 1 para uma mesma altura. Além disso, foi observado um menor arrasto e maior *downforce* para os protótipos mais próximos ao solo, com altura de 50 mm.

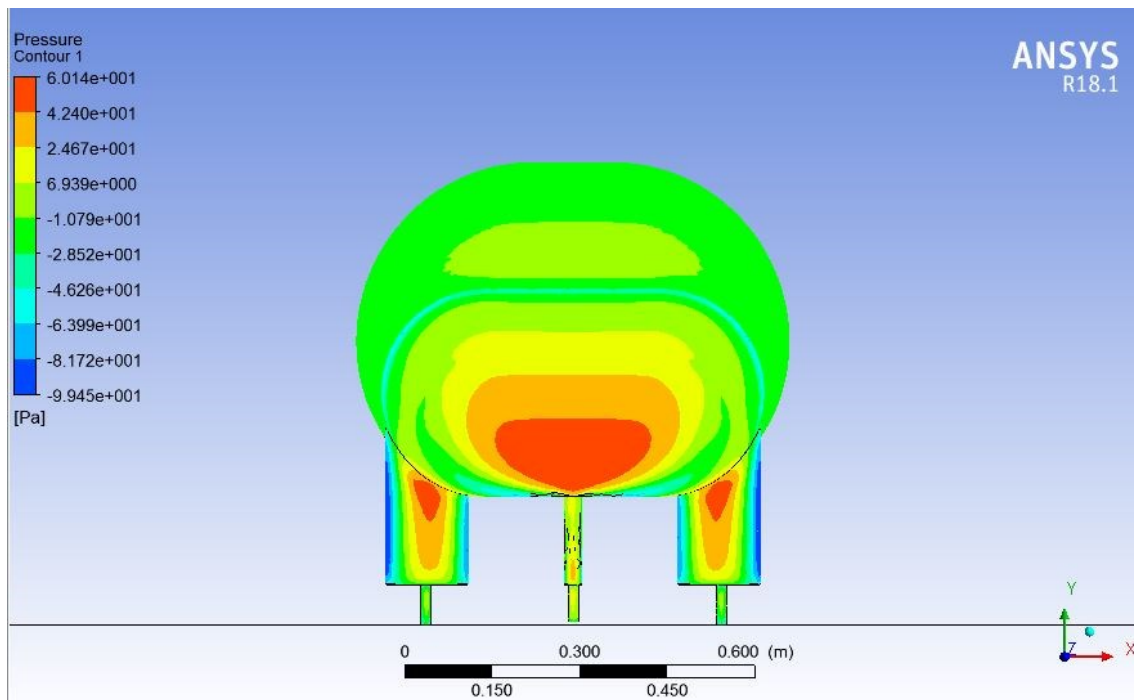
Assim como no modelo 1, o coeficiente de arrasto cresceu com o aumento de altura, as Figuras 25 e 26 mostram que devido ao crescimento das caixas de roda e conseqüentemente o aumento da área frontal, aumentou-se também os pontos de pressão no modelo, isso fez com que os valores das forças de arrasto e seu coeficiente aumentassem também.

Figura 25 - Contornos de pressão para altura de 50 mm do modelo 2



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS® 18.1. (2019)

Figura 26 - Contornos de pressão para altura de 150 mm do modelo 2

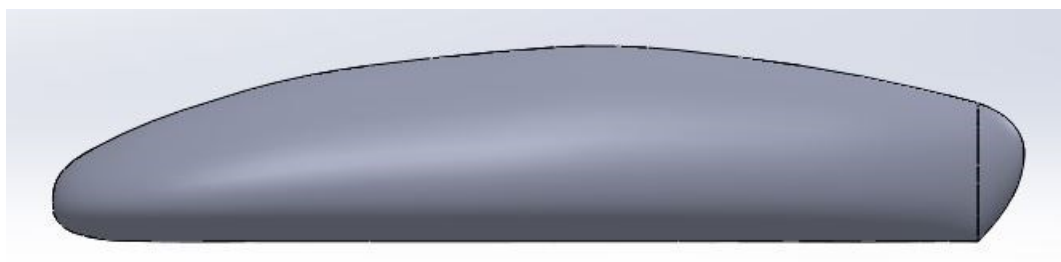


Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS® 18.1. (2019)

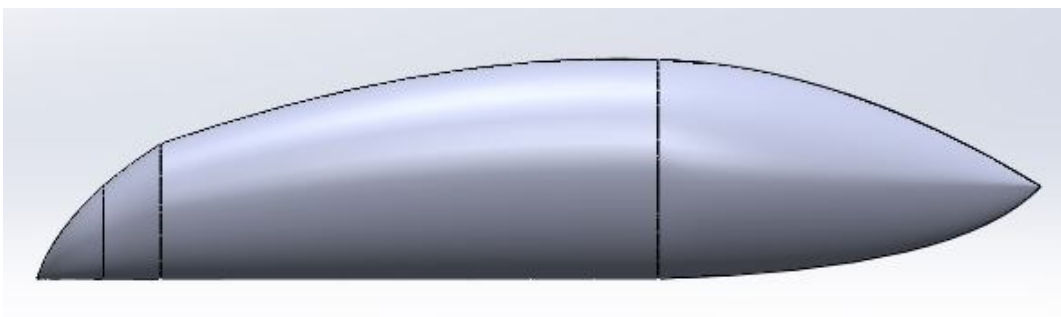
5.3 Modelos dos protótipos sem rodas

A fim de analisar a real influência do efeito solo, novos modelos foram criados, dessa vez sem as caixas de rodas e pneus, mantendo assim a área sempre constante e variando apenas a altura do protótipo com relação ao solo. A Figura 27 exemplifica essa alteração.

Figura 27 – Modelo 1 (a) e modelo 2 (b) sem caixas de roda e pneus



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria realizada no SolidWorks® 16. (2019)

5.3.1 Modelo 1 sem rodas

Para o modelo 1, foi considerado o protótipo sem o corpo arredondado na região dianteira do protótipo. Isso para que as simulações sejam mais precisas e mais adequadas ao modelo de turbulência.

Para as novas simulações, será utilizado o modelo de turbulência Spalart-Allmaras, devido a esse modelo ser recomendado para modelos aerodinâmicos, como asas e aerofólios, mas sem esteira turbulenta, como rodas. As variações de alturas e configurações de malha e *setup* seguem sendo as mesmas. A

Tabela 9, a seguir, apresenta os dados de nós e elementos gerados para o modelo de protótipo 1 sem rodas, além do tempo de processamento e o *Yplus* na região do protótipo.

Tabela 9 - Dados de malha e setup para o modelo 1 sem rodas

Altura [mm]	Nós	Elementos	Tempo de processamento [min]	<i>Yplus</i> (y+)
50	1.206.419	4.561.354	181	42,3519
75	1.203.733	4.604.331	113	43,4352
100	1.199.731	4.628.265	174	42,9430
125	1.199.503	4.691.898	112	43,7645
150	1.214.573	4.787.594	194	43,1307

Fonte: Autoria própria realizada no Excel®. (2019)

Para as forças de arrasto e sustentação calculadas, os dados são apresentados na tabela 10, a seguir:

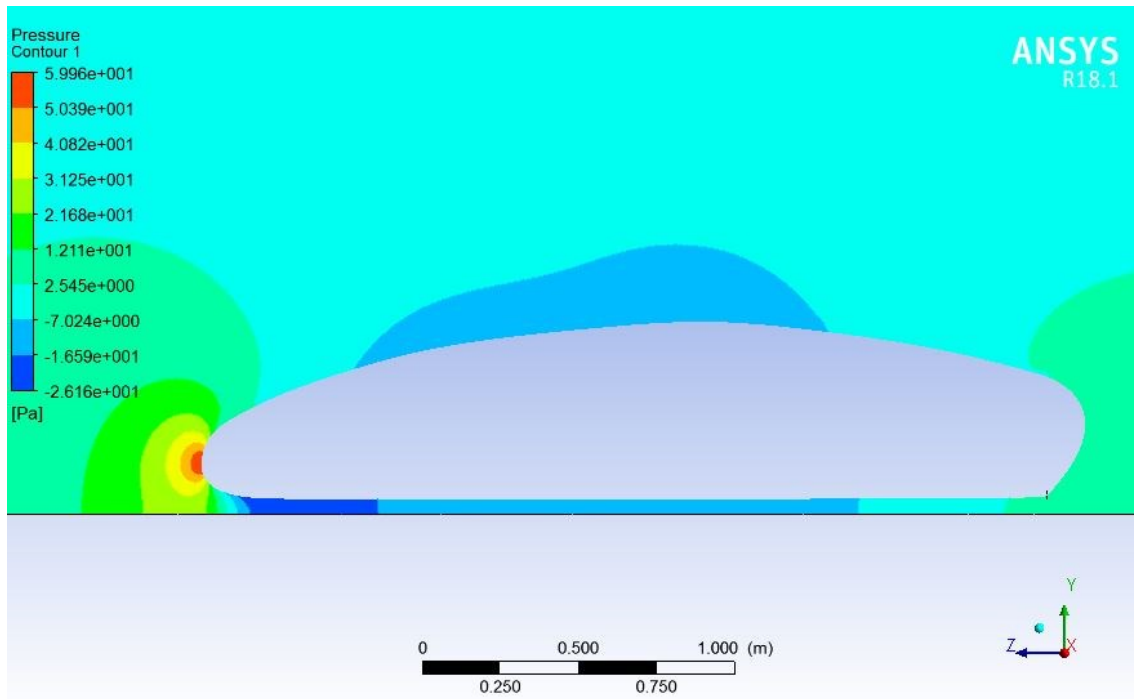
Tabela 10 - Forças e áreas para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação para o modelo 1 sem rodas

Altura [mm]	Área superior [m ²]	Área frontal [m ²]	Força de sustentação [N]	Força de arrasto [N]	CD	CL (-)
50	4,8159	0,3187	-3,56379	2,0934	0,110955402	0,012500084
75	4,8159	0,3187	-3,00969	2,07954	0,110220787	0,010556564
100	4,8159	0,3187	-2,5647	2,06058	0,10921586	0,008995751
125	4,8159	0,3187	-2,22972	2,03913	0,108078957	0,0078208
150	4,8159	0,3187	-1,94388	2,02443	0,10729982	0,006818209

Fonte: Autoria própria realizada no Excel®. (2019)

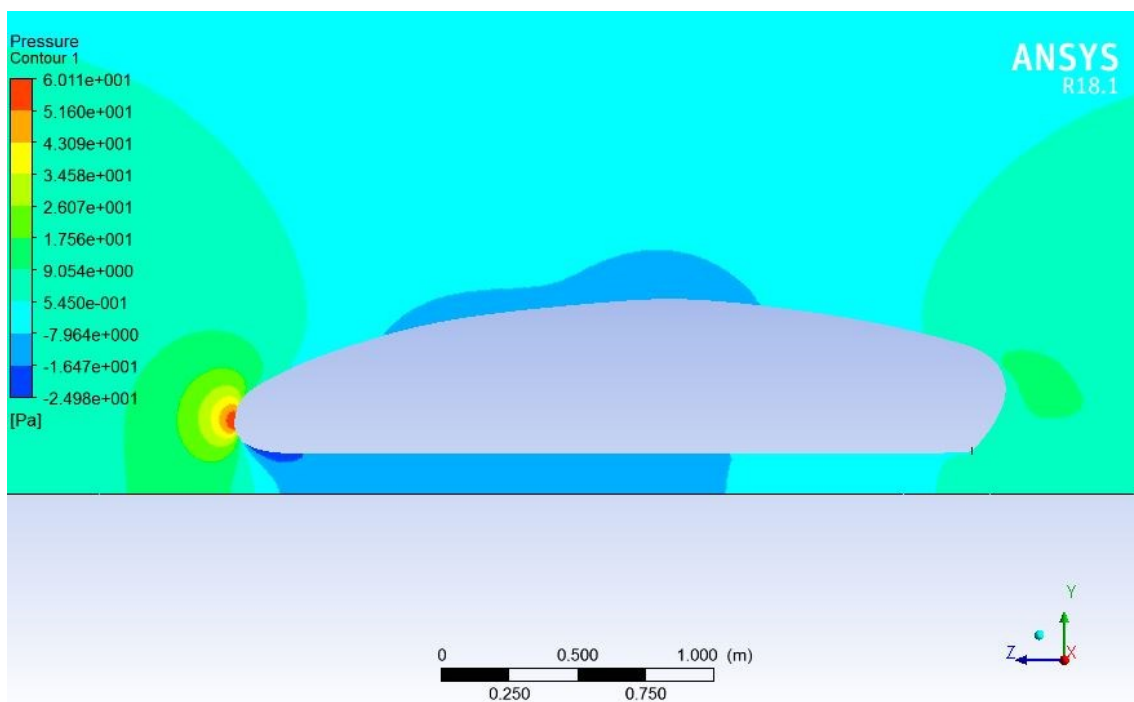
É observado que para uma mesma área frontal, um aumento na altura do protótipo em relação ao solo causa uma grande diminuição do *downforce* gerado no protótipo, além de uma leve diminuição do arrasto. As Figuras 28 e 29, a seguir, apresentam os contornos de pressão atuantes no protótipo para diferentes alturas.

Figura 28 - Contorno de pressão para o modelo 1 sem rodas com altura de 50mm em relação ao solo



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS ® 18.1. (2019)

Figura 29 - Contorno de pressão para o modelo 1 sem rodas com altura de 150mm em relação ao solo



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS ® 18.1. (2019)

Pode-se observar que o valor da pressão incidindo sobre o protótipo com 50 mm de altura em relação ao solo é maior quando comparado ao protótipo com 150 mm, isso evidencia seu maior valor de sustentação negativa e comprova os estudos realizados por Hucho (1998), A. R. George (1981) e Soares (2013), que determinam que para uma menor altura de protótipo em relação ao solo, o *downforce* é maior.

5.3.2 Modelo 2 sem rodas

Para o modelo 2 sem as rodas, os parâmetros de malha, alturas utilizadas e configurações da simulação seguem sendo os mesmos utilizados para o modelo 1 sem rodas. A tabela 11, a seguir, apresenta os dados de nós e elementos gerados para o modelo de protótipo 2 sem rodas, além do tempo de processamento e o *Yplus* na região do protótipo.

Tabela 11 - Dados de malha e setup para o modelo 2 sem rodas

Altura [mm]	Nós	Elementos	Tempo de processamento [min]	<i>Yplus</i> (y+)
50	1.105.709	4.206.814	163	43,0249
75	1.103.960	4.243.984	103	43,4308
100	1.104.160	4.281.928	169	42,847
125	1.104.580	4.324.129	107	42,2002
150	1.109.124	4.384.479	164	42,1123

Fonte: Autoria própria realizada no Excel®. (2019)

Para as áreas, forças de arrasto e sustentação calculadas, os dados são apresentados na tabela 12, a seguir:

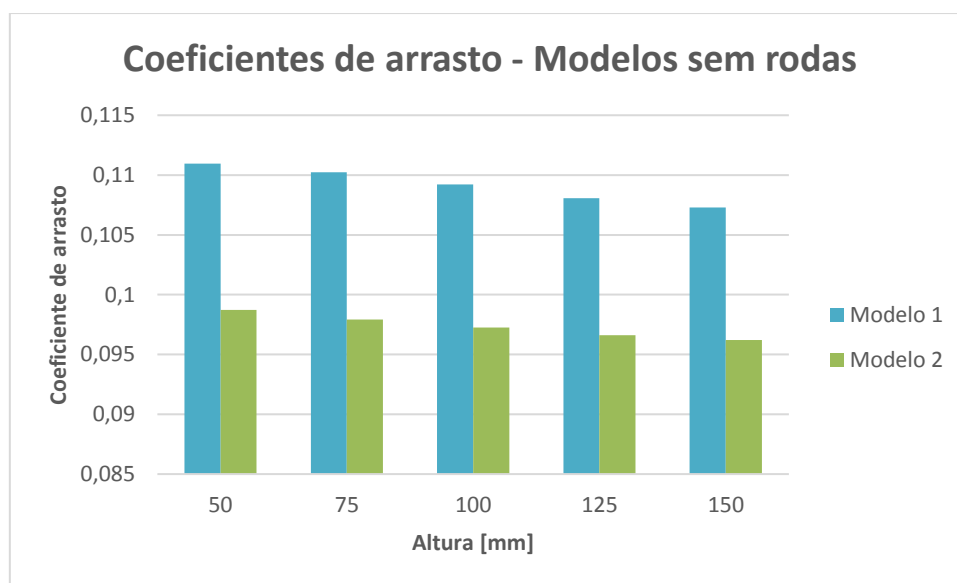
Tabela 12 - Forças e áreas para definição dos coeficientes de arrasto e sustentação para o modelo 2 sem rodas

Altura [mm]	Área superior [m ²]	Área frontal [m ²]	Força de sustentação [N]	Força de arrasto [N]	CD	CL (-)
50	4,4176	0,3581	-3,46914	2,09274	0,098716386	0,013265198
75	4,4176	0,3581	-2,98504	2,07566	0,097910707	0,01141411
100	4,4176	0,3581	-2,62753	2,06189	0,097261164	0,010047074
125	4,4176	0,3581	-2,43699	2,04782	0,09659747	0,009318492
150	4,4176	0,3581	-2,16256	2,03951	0,09620548	0,008269135

Fonte: Aatoria própria realizada no Excel®. (2019)

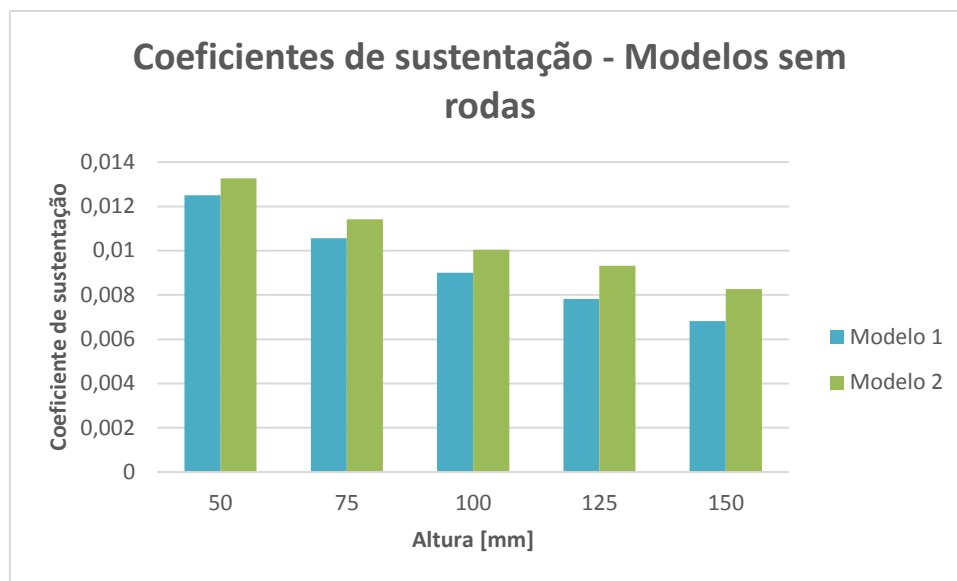
Um comparativo entre os coeficientes de arrasto e sustentação dos modelos 1 e 2 sem rodas são apresentados nas Figuras 30 e 31.

Figura 30 – Coeficientes de arrasto para os modelos 1 e 2 sem rodas



Fonte: Aatoria própria realizada no Excel®. (2019)

Figura 31 – Coeficientes de sustentação para os modelos 1 e 2 sem rodas

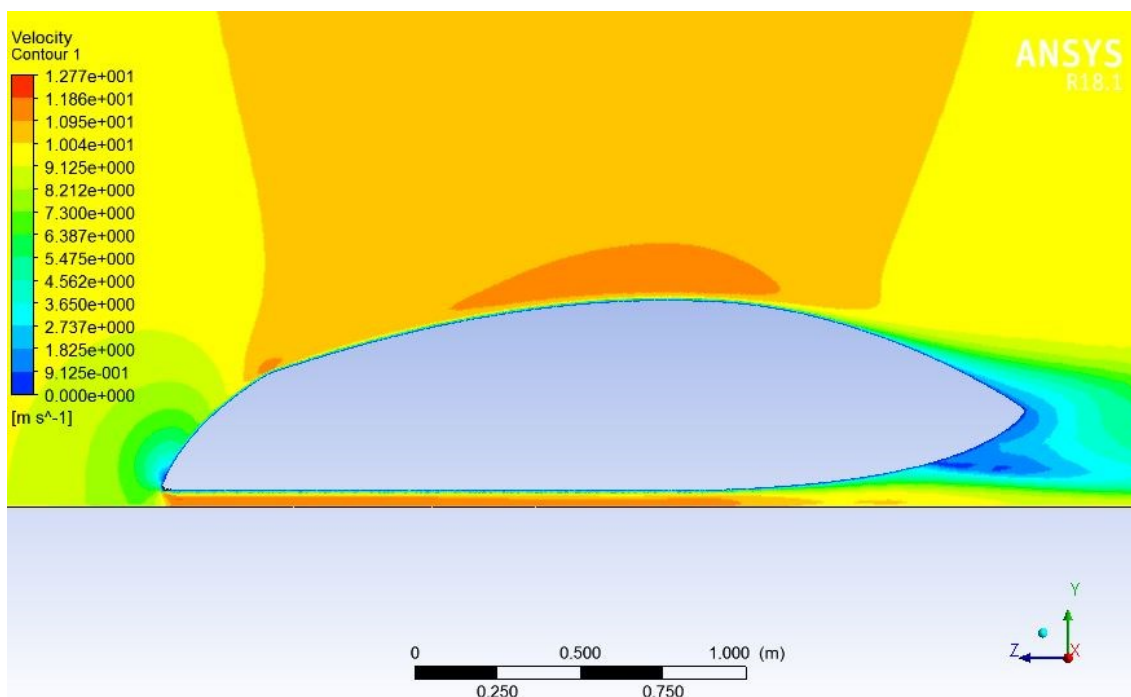


Fonte: Autoria própria realizada no Excel®. (2019)

Nota-se que o modelo 2 possui menor coeficiente de arrasto e maior *downforce* quando comparado ao modelo 1 para uma mesma altura. Além disso, foi observado um maior arrasto e maior *downforce* para os protótipos mais próximos ao solo, com altura de 50 mm.

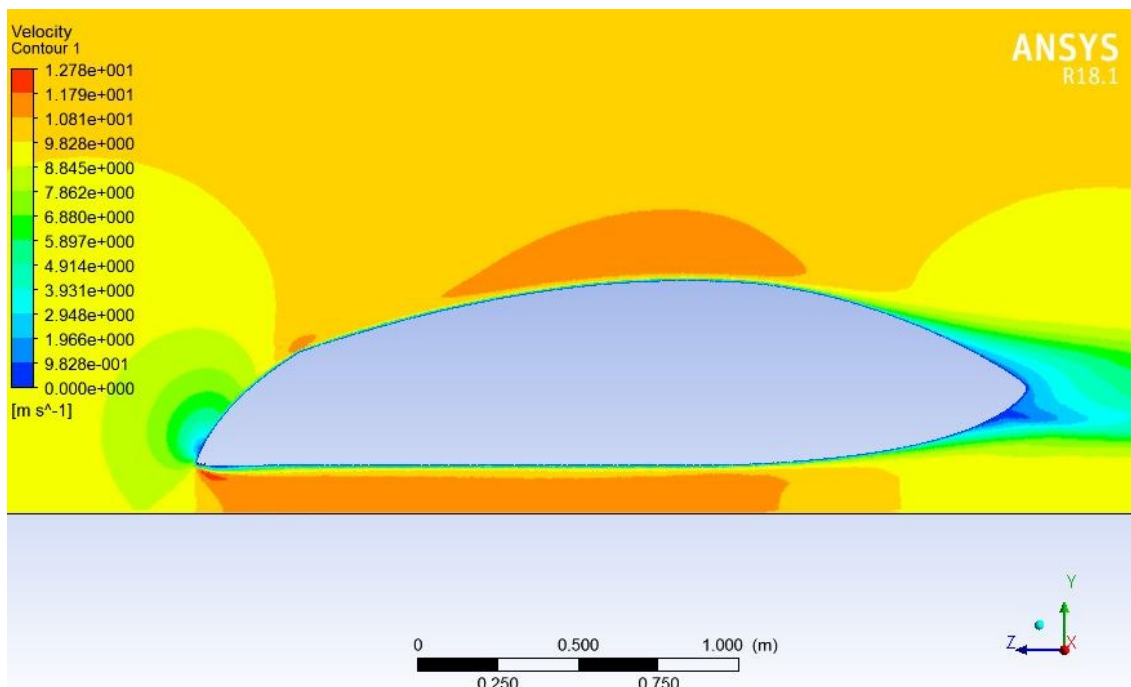
Pode-se observar que o modelo 2 sem rodas teve o mesmo comportamento do modelo 1 sem rodas, uma grande variação na força de sustentação com uma leve penalidade no arrasto para menores alturas. As Figuras 32 e 33 apresentam os contornos de velocidade para o modelo 2.

Figura 32 - Contorno de velocidade para o modelo 2 sem rodas com altura de 50mm em relação ao solo



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS ® 18.1. (2019)

Figura 33 - Contorno de velocidade para o modelo 2 sem rodas com altura de 150mm em relação ao solo



Fonte: Autoria própria realizada no ANSYS ® 18.1. (2019)

O modelo mais próximo ao chão possui um maior confinamento do fluxo de ar, fazendo com que a velocidade aumente. Esse aumento na velocidade entre a parte de baixo do protótipo e o solo baixa a pressão e aumenta o *downforce* no veículo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Portanto, foi observado que mantendo uma área fixa e variando-se apenas a altura, os modelos corresponderam com o esperado. Porém, não é algo possível de ser aplicado na prática, pois as caixas de roda devem acompanhar a altura do protótipo em sua construção.

Como esse trabalho visa buscar a melhor geometria e aerodinâmica para o protótipo, serão considerados os dados obtidos nas simulações dos modelos 1 e 2 com rodas.

Um indicador muito utilizado na Fórmula 1 é o de *lift to drag ratio*, que se resume na divisão entre o coeficiente de sustentação pelo coeficiente de arrasto. Como na Fórmula 1 busca-se um alto valor de *downforce*, um resultado considerado bom na divisão seria um alto valor negativo, visto que o coeficiente de sustentação é negativo pois a força pressiona o protótipo contra o solo. Esse indicador de *lift to drag ratio* também é utilizado na aviação, onde se busca o maior valor, porém positivo.

No caso da Equipe Pato a Jato, pretende-se alcançar a maior eficiência energética para o protótipo, portanto, é necessário que o coeficiente de arrasto seja o mais baixo possível. A Tabela 13, a seguir, apresenta a relação entre os coeficientes de sustentação e arrasto encontrados nos modelos.

Tabela 13 - Relação entre coeficientes de sustentação e arrasto para os modelos 1 e 2 com rodas

Modelo 1			
Altura [mm]	Coeficiente de arrasto	Coeficiente de sustentação	CL(-) / CD
50	0,114367107	0,008252155	0,072155
75	0,11983966	0,007985794	0,0666373
100	0,119927398	0,00776496	0,0647472
125	0,125120946	0,007636584	0,0610336
150	0,128392743	0,006470332	0,0503948

Modelo 2			
Altura [mm]	Coefficiente de arrasto	Coefficiente de sustentação	CL(-) / CD
50	0,103655583	0,011531729	0,1112504
75	0,106566269	0,011311098	0,1061414
100	0,111781497	0,010988371	0,0983022
125	0,117323733	0,00946154	0,0806447
150	0,126494082	0,007901823	0,0624679

Fonte: Aatoria própria realizada no Excel®. (2019)

Com esses dados, pode-se observar que o caso que melhor atende a necessidade da Equipe Pato a Jato é o modelo 2 com 50 mm de altura. Isso se deve ao baixo valor encontrado para o coeficiente de arrasto, e mesmo assim, com um alto valor de *downforce*. Apesar de na teoria uma menor altura obter um maior arrasto, para o modelo em questão, o acréscimo na área frontal apresentado para as maiores alturas fez com que o arrasto aumentasse junto, tornando seu coeficiente maior do que o encontrado em baixas alturas.

7 CONCLUSÃO

Durante os estudos realizados ao longo desse trabalho, considera-se satisfatório o nível de conhecimento adquirido. Visando que, o setor de transportes é considerado uma necessidade no cotidiano da sociedade moderna, sendo uma das mais importantes forças motrizes da economia. O crescimento deste setor ocorre, em geral, de forma desordenada, causando diversos impactos ambientais, resultando na aceleração de emissão de gases de efeito estufa. Dessa forma, o estudo de eficiência energética veicular pode proporcionar pesquisas às quais visam, maior desempenho energético dos veículos e os objetivos da política energética nacional.

No presente trabalho, pôde-se analisar a influência do arrasto e da sustentação para diferentes alturas de protótipos, relacionando suas perdas aerodinâmicas com o efeito solo. Através de simulações fluidodinâmicas, obteve-se resultados que comprovaram pesquisas feitas por diversos autores, trazendo o estudo para o universo das competições de eficiência energética.

Durante o desenvolvimento, muito conhecimento foi gerado com relação a modelagem computacional feita através do software SolidWorks® 2016. Foram criados dois modelos de protótipos, com um total de dez variações de geometria. Todos os protótipos foram, obrigatoriamente, desenvolvidos seguindo as dimensões normatizadas vigentes da Shell Eco-marathon, edições Brasil e Américas.

No que diz respeito as simulações fluidodinâmicas computacionais, desenvolveu-se habilidades na utilização do software ANSYS® 18.1, devido ao estudo sobre modelos de turbulência, geração e refino de malhas e na obtenção e análise de resultados. Ainda no decorrer do trabalho, foram apresentados fatores que influenciam na precisão das simulações e boas práticas utilizadas em softwares do gênero CFD.

Dessa forma, com os dados obtidos, pôde-se realizar uma análise do arrasto e da sustentação gerados em todas as variações de modelos e, assim, determinar o protótipo com melhor eficiência aerodinâmica. Os resultados obtidos nesse trabalho serão de grande importância para o desenvolvimento do novo protótipo que será construído pela Equipe Pato a Jato, ajudando na consolidação e expansão do projeto realizado na UTFPR campus Pato Branco.

Como recomendação de trabalhos futuros, que sigam a mesma linha de pesquisa, podem ser feitos estudos sobre a criação de protótipos em escalas reduzidas ou reais, para análises fluidodinâmicas em túneis de vento, a fim de comparar os resultados com os valores encontrados nas simulações computacionais. Além disso, podem ser realizados estudos acerca do comprimento do protótipo e sua relação com o arrasto e sustentação sendo influenciados por ventos cruzados. Por fim, outra sugestão de trabalho futuro seria realizar a análise quantitativa das emissões de poluentes locais evitadas devido à implantação de um programa de eficiência energética.

REFERÊNCIAS

- ABRAMCHUK, Vagner. **Estudo da Força de arrasto sobre veículos de transporte de pessoas empregando CFD**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014.
Disponível em <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/96315>
- ANSYS® Academic Research Mechanical, Release 18.1, ANSYS, Inc., 2010.
- ANSYS. **Lecture 02 Introduction to the CFD Methodology and CFX. Introduction to ANSYS. CFX. PDF**. 2011/2012.
- ARRONILAS. M. **Estudos em Sistema de Direção Veicular**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2005
- BOSCH, Bruno. **Análise Aerodinâmica de um protótipo de eficiência Energética por Simulação Fluidodinâmica Computacional (CFD)**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, 2016.
Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/7338>
- DANIEL, S. H. LO. **Finite Element Mesh Generation**. CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.
- ECKERMAN, Erik. **World History of the Automobile**, 2001, p.14.
- FOX, Robert W.; PRITCHARD, Philip J.; MCDONALD, Alan T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 7a ed. Rio de Janeiro, 2011.
- FRENCH, A. P. **Newtonian Mechanics (The M.I.T. Introductory Physics Series)**. 1a ed. New York, 1970.
- GEORGE, A. R. **Aerodynamic Effects of Shape, Camber, Pitch, and Ground Proximity on Idealized Ground-Vehicle Bodies**. Cornell University, 1981.
- GILLESPIE, T. D. **“Fundamentals of Vehicle Dynamics”**. Warrendale: **Society of Automotive Engineers, Inc**, 1992.
- HOWELL JP, **Shape features which influence crosswind sensitivity. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, IMechE 1993-9, Vehicle Ride and Handling, pp. 43-52.
- HUCHO W-H, **Aerodynamics of Road Vehicles**, 4th edition. SAE. International, 1998.
- KENT, Walter G. **An Appreciation of two Great Workers in Hydraulics**. Londres: BladesEast&Blades, 1912.

KESSLER, Martin. **Fluidodinâmica Computacional: O que é?** ESSS. 2016. Disponível em: (<https://www.esss.co/blog/fluidodinamica-computacional-o-que-e/>) – Acesso em 29/09/2018

MUNIZ, Luis Antonio Resende. **Método dos volumes finitos aplicados à problemas de escoamentos bidimensionais na região de entrada de dutos cilíndricos**. UNICAMP. 1995. Campinas – SP
Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/267367/1/Muniz_LuisAntonioRezende_M.pdf

NUSSENZVEIG, H. MOYSÉS. **Curso de Física Básica**. 3a ed. São Paulo: Edgard Blucher. p. 26. 1996

SHAW, C. T. **Using Computational Fluid Dynamic**. 1a ed. USA, Prentice Hall, 1992.

SHELL, **Nossa História**. 2015.
Disponível em: <https://www.shell.com.br/sobre-a-shell/nossa-historia.html>

SHELL, **Shell Eco Marathon 2019 Global Rules, Chapter I**. 2018.
Disponível em: <https://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon.html>

SOARES, Renan Francisco. **Estudo Fluidodinâmico Computacional (CFD) aplicado à aerodinâmica do esporte Automobilístico**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Renan_Soares3/publication/271825573_Estudo_Fluidodinamico_Computacional_CFD_Aplicado_a_Aerodinamica_do_Esporte_Automobilistico/links/54d224c70cf25ba0f042687a/Estudo-Fluidodinamico-Computacional-CFD-Aplicado-a-Aerodinamica-do-Esporte-Automobilistico.pdf

SOUSA, Bruno Silva de; GONÇALVES, Hugo Henrique Azevedo. **Análise da aerodinâmica de carros populares**. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri. Minas Gerais, 2013.

SUCH, Mateus Rosa. **Análise Aerodinâmica de um Veículo de Eficiência Energética**. Grupo de pesquisa em eficiência energética de sistemas veiculares – Laboratório de Motores de Combustão Interna – LABMCI. Joinville. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188252>

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**. New York, United States, 1995.

ZAMOLO, Riccardo; NOBILE, Enrico. **External aerodynamics over Ahmed's body with ANSYS Fluent**. DIA - Dipartimento di Ingegneria e Architettura Università degli Studi di Trieste, 2017.

ZHANG, X.; TOET, W.; ZERIHAN, J. **Ground Effect Aerodynamics of Race Cars**. University of Southampton, 2006.